MODEL KEANDALAN MANUSIA BERBASIS BEBAN KERJA KOGNITIF PADA OPERATOR RUANG KONTROL JASAMARGA TOLL ROAD OPERATOR (JMTO)

PROPOSAL PENELITIAN DISERTASI

Oleh

GALUH KRISNA DEWANTI

NIM: 263022300010

Program Studi Doktor Teknik Industri



UNIVERSITAS TRISAKTI

FEBRUARI 2025

MODEL KEANDALAN MANUSIA BERBASIS BEBAN KERJA KOGNITIF PADA OPERATOR RUANG KONTROL JASAMARGA TOLL ROAD OPERATOR (JMTO)

Oleh

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

Universitas Trisakti

Menyetujui
Tim Pembimbing

Tanggal ……..

Ketua

_____

Dr. Pudji Astuti, M.T.

Anggota

_____

Prof. Parwadi Moengin, Ph.D

Anggota

_____

Dr. Dian Mardi Safitri, S.T.,M.T

ABSTRAK

MODEL KEANDALAN MANUSIA BERBASIS BEBAN KERJA KOGNITIF PADA OPERATOR RUANG KONTROL JASAMARGA TOLL ROAD OPERATOR (JMTO)

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

Ruang Kendali Jasa Marga Tollroad Operator (JMTO) 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 JMTO. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah integrasi metode *Visual Auditori Cognitive Psikomotor* (VACP), metode *Failure Mode and Effect Analysi*s (FMEA) dan metode *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM).

Kata kunci: JMTO, keandalan manusia, beban kerja, VACP, FMEA, CREAM

ABSTRACT

HUMAN RELIABILITY MODEL BASED ON COGNITIVE WORKLOAD IN JASAMARGA TOLL ROAD OPERATOR (JMTO) CONTROL ROOM OPERATORS

By
GALUH KRISNA DEWANTI
NIM: 26302300010
(Doctoral Program in Industrial Engineering)

The Jasa Marga Tollroad Operator (JMTO) Control Room is the first digital toll road traffic control center in Indonesia, supported by the Intelligent Transportation System (ITS), Advanced Traffic Management System (ATMS), Incident Management System, Advanced Vehicle Control and Safety System (AVCSS), and Advanced Traveler Information System (ATIS). In its operations, operators face high workloads due to multitasking demands, such as real-time CCTV monitoring, traffic sensor management, and simultaneous coordination with field teams. These conditions are exacerbated by communication disruptions and the pressure to respond quickly to incidents, increasing the risk of human error. Such errors can lead to delays in incident handling, traffic congestion, and poor decision-making. Therefore, human reliability has become a critical issue to examine in efforts to improve toll road operational efficiency and safety. This study aims to enhance the reliability of JMTO operators. The methods employed in this research are the integration of the Visual Auditory Cognitive Psychomotor (VACP) method, the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method, and the Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM).

Keywords: JMTO, human reliability, workload, VACP, FMEA, CREAM

DAFTAR ISI

ABSTRAK iii
ABSTRACT iv
DAFTAR ISI v
DAFTAR LAMPIRAN vi
DAFTAR GAMBAR DAN ILUSTRASI vii
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG ix
Bab 1 Pendahuluan 1
1.1 Latar Belakang 1
1.3 Tujuan Penelitian 12
1.4 Ruang Lingkup Penelitian 12
1.5 Kebaruan Penelitian 13
1.6 Manfaat Penelitian 13
1.7 Sistematika Penulisan 14
Bab 2 Studi Literatur 1
2.1 Studi literatur 1
2.1.2 Faktor Manusia (Ergonomi) dalam sistem yang kompleks .. 3
2.1.3 Analisis Keandalan Manusia (*Human Reliability Analysis*) 5
2.1.4 Kesalahan Manusia (Human Error) dalam sistem yang komplek ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.1.5 Mitigasi Kesalahan Manusia (Mitigation Human Error) ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.2 Beban Kerja Kognitif ..... **Error! Bookmark not defined.**
2.3 Posisi Penelitian 10
2.5 Model Awal ..... **Error! Bookmark not defined.**
Daftar Pustaka 13

DAFTAR LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR DAN ILUSTRASI

Gaambar 1.1 Sistem JMTO 1
Gambar 1.2 Ruang Kontrol JMTO 3
Gambar 2.1 Prisma Flow Diagram 11
Gambar 2.2 Time line Penelitian Analisis Keandalan Manusia 23
Gambar 2.3 Kerangka pikir Penelitian 33
Gambar 2.4 model Awal Keandalan Operator 34

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil Pencarian Berdasarkan Kata Kunci 10
Tabel 2.1 Review Artikel Faktor Manusia/Ergonomi 12
Tabel 2.3 Perkembangan Penelitian Analisis Keandalan Manusia.....18
Tabel 2.4 Review artikel terkait kesalahan manusia dalam sistem yang kompleks 24
Tabel 2.5 Artikel Terkait Mitigasi Kesalahan Manusia 28
Tabel 2.6 Literatur terkait beban kognitif mempengaruhi keandalan manusia .. 31
Tabel 2.7 Posisi Penelitian 32

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

Bab 1 Pendahuluan

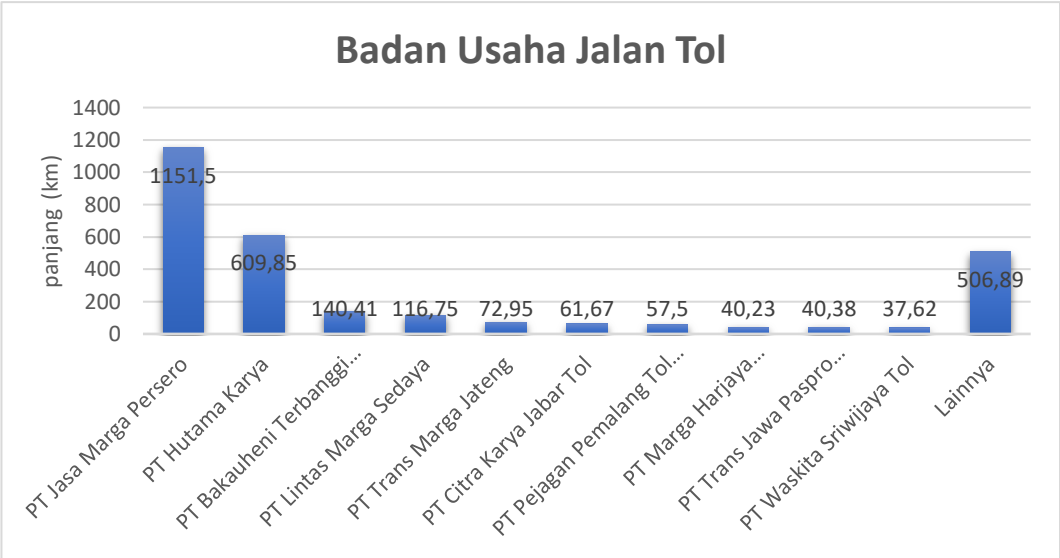
Pada bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup/batasan masalah, kebaruan, orisinalitas dan sistematika penulisan.

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 antarkota, tetapi juga berperan penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi, meningkatkan mobilitas masyarakat, dan memperkuat integrasi wilayah. Saat ini, jumlah jalan tol di Indonesia terus bertambah. Hingga akhir tahun 2023 total jalan tol yang beroperasi di Indonesia adalah 2.839 Kilometer (km) dan akan bertambah tiap tahunnya. Total panjang tol tersebut terbagi menjadi 73 ruas jalan tol jalan tol yang dikelola 52 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.

Sebagai ibu kota sekaligus pusat bisnis, Jakarta memiliki peran kunci dalam jaringan jalan tol nasional. Keterhubungan Jakarta dengan kota-kota lain melalui jalan tol telah 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. 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. Oleh karena itu ruang kendali jalan tol menjadi bagian yang sangat penting untuk operasional jalan tol. Menurut (Braarud, 2024) ruang kendali memiliki peran penting dalam menjaga produksi, mencegah anomali, dan mengurangi potensi kecelakaan.

Sebagai pengelola jalan tol terbesar di Indonesia, Jasamarga memiliki ruang kendali dalam pengelolaan operasional jalan tol yaitu Jasamarga *Tollroad Operator* (JMTO).



Gambar 1.1 Grafik Badan Pengelola Jalan Tol

Ruang kendali Jasa Marga *Tollroad Operator* (JMTO) merupakan pusat kendali pengelolaan lalu lintas jalan tol yang dikelola Jasa Marga. Ruang kendali JMTO berfungsi pengelola operasional jalan tol yang dikelola Jasamarga. Pengelolaan disini adalah pelayanan lalu lintas dan pelayanan transaksi. Pelayanan Transaksi di JMTO didukung oleh sistem *Electronic Toll Collection* (ETC). Dalam Pelayanan Lalu lintas, JMTO didukung oleh sistem *Advanced Traffic Management System* (ATMS), *Incident Management System* (IMS), *Advanced Vehicle Control and Safety System* (AVCSS), dan *Advanced Traveler Information System* (ATIS).

Advanced Traffic Management System (ATMS) merupakan sistem pengelolaan lalu lintas dan rekayasa lalu lintas melalui pengumpulan informasi, pemrosesan, dan analisis real-time, dimana output yang dihasilkan bisa menjadi dasar untuk dilakukan preventif manajemen lalu lintas jalan tol. Sistem ini mendapat informasi melalui pemantauan platform JID, laporan petugas dan pengguna jalan. ATMS-JMTO dapat mendeteksi dan menganalisis secara otomatis adanya perubahan kecepatan dan volume melalui platform JID sehingga dapat diketahui kecepatan

rata-rata per segmen per periode waktu dan volume kendaraan per segmen per perionde waktu. Jika terjadi kepadatan lalu lintas, JMTO dapat berkoordinasi dengan stakeholder untuk melakukan rekayasa lalu lintas.

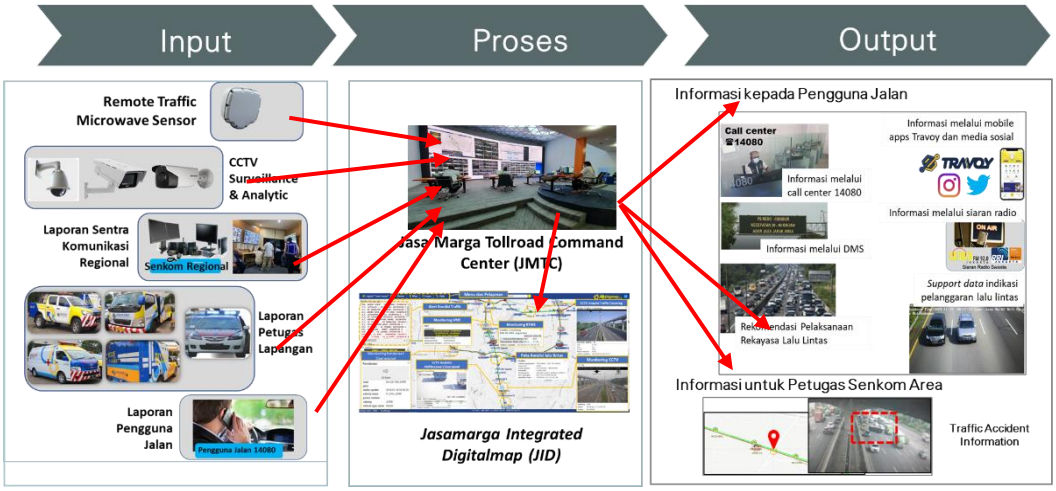
Incident Management System (IMS) adalah sebuah sistem pendeteksi dini gangguan lalu lintas dengan mengidentifikasi adanya suatu perubahan kecepatan kendaraan secara signifkan, yang berfungsi sebagai percepatan penanganan terhadap kejadian kecelakaan yang terjadi di jalan tol, sehingga dapat mengurangi fatalitas dan kepadatan akibat kecelakaan. Mekanisme dalam sistem ini adalah JMTO mendeteksi adanya kepadatan dan anomali perubahan kecepatan pada suatu titik lokasi melalui platform JID dan segera memastikan penyebab dari kepadatan lalu lintas tersebut. JMTO memastikan penyebab terjadinya kepadatan lalu lintas dan lokasi terjadinya kejadian luar biasa seperti Kecelakaan Luar Biasa, Kebakaran, Tumpahan B3, Banjir, dll. JMTC berkoordinasi dengan regional dan ruas terkait untuk segera melakukan penyelamatan dan pengaturan lalu lintas di lokasi kejadian. Kemudian JMTO berkoordinasi dengan para stakeholder untuk melakukan rekayasa lalu lintas agar kepadatan dapat terurai.

Advanced Vehicle Control and Safety System (AVCSS) adalah Sistem pendeteksi otomatis pelanggaran lalu lintas yang terjadi di jalan tol seperti pelanggaran kecepatan dan muatan, pendeteksian kendaraan roda dua masuk jalan tol, pelanggaran bahu jalan. Mekanisme sistem ini adalah JMTO melakukan pemantauan melalui JID, melalui bantuan peralatan kamera analitik dengan pendeteksi plat nomor kendaraan, kecepatan, lokasi dan *weigh in motion* dan selanjutnya diteruskan kepada stakeholder terkait untuk ditindaklanjuti.

Advanced Traveler Information System (ATIS) sistem pendukung sistem pelayanan lalu lintas JMTO dengan memberikan informasi kepada pengguna jalan baik sebelum melakukan perjalanan, maupun dalam perjalanan melalui Travoy mobile apps, otomatisasi informasi lalu lintas terupdate dan terintegrasi melalui DMS, dan one call center 14080. Mekanisme sistem ini adalah JMTO melakukan pemantauan melalui platform JID, laporan petugas dan pengguna jalan. Kemudian JMTO memberikan informasi kepada pengguna jalan melalui aplikasi Travoy, Twitter,

Dynamic Message Sign (DMS), Radio dan *call-center* 14080 yang dapat diakses sebelum perjalanan maupun selama perjalanan. Dari sistem ini pengguna jalan dapat merencanakan perjalanan dengan lebih baik.

JMTO 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 JMTO

Gambar 1.2 Menunjukkan integrasi teknologi digital dengan input kamera pengawas CCTV kemudian diproses oleh JMTO menggunakan Jasamarga Integrated Digitalmaps (JID) dan output informasi ke Aplikasi mobile (Travoy), media sosia, call center dan *Dynamic Massage Signs* (DMS). Input dari JMTO 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 JMTO 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 *Jasa Marga Tollroad Operator* (JMTO). 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 JMTO juga berkolaborasi dengan pemangku kepentingan untuk mewujudkan kelancaran, ketertiban dan memastikan semua berjalan sesuai aturan yang telah ditentukan.

Setelah diolah oleh JMTO, 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 JMTO 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. JMTO 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).

Namun penggunaan sistem digital dapat menimbulkan risiko baru, seperti ancaman keamanan syber (Dogan et al., 2024). Pergeseran peran karena digitalisasi dapat menyebabkan ketergantungan yang berlebihan pada teknologi, berpotensi mengganggu kemampuan pengawasan dan intervensi manusia(wilhelmsen et al., 1992). Meskipun sebuah sistem sudah digital dan otomatis, namun manusia masih tetap dibutuhkan karena peran manusia menjadi elemen penting dalam pengoperasian, pengawasan dan mitigasi resiko pada sistem tersebut.

Kesalahan yang dilakukan oleh operator ruang kendali bisa disebabkan oleh sejumlah faktor seperti kelelahan, kurangnya pelatihan, beban kerja yang terlalu berat, gangguan di lingkungan kerja, serta kegagalan dalam komunikasi dan koordinasi. Dampak dari kesalahan ini seringkali sangat serius, menyebabkan kerugian besar baik dalam hal korban jiwa, kerusakan infrastruktur, maupun kerugian ekonomi. Beberapa insiden kecelakaan yang yang terjadi akibat dari kesalahan operator ruang kendali diantaranya Kecelakaan penerbangan pesawat Qantas Airbus A330 di tahun 2008 yang disebabkan kesalahan perangkat lunak kontrol penerbangan dan kesalahan operator dalam menangani situasi (https://www.atsb.gov.au/aviation-investigation-reports), kecelakaan kapal pesiar Yacht Land's End yang tenggelam karena manajemen dan operator ruang kendali yang buruk dalam navigasi

(https://www.gov.uk/government/organisations/marine-accident-investigation-branch), Kereta Api Amtrak tergelincir di Philadelphia karena kecepatan berlebih yang dipengaruhi oleh kesalahan operator pada tahun 2015 (https://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/Reports.aspx).

Human Reliability Analysis (HRA) dirancang untuk mengidentifikasi, memodelkan, mengukur, dan mengurangi peran manusia dalam Terjadinya kegagalan sistem (P. Liu et al., 2020a). 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 mengenai keandalan manusia dalam ruang kontrol industri petrokimia (Knisely, et al 2020) menemukan faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kesalahan manusia yaitu kurangnya pemberdayaan, kondisi kerja, multitasking, pelatihan yang tidak memadai, serta waktu yang tersedia untuk bekerja. Selain itu Faktor organisasi, kondisi lingkungan kerja, kompleksitas teknologi, waktu yang tersedia, pengalaman, kolaborasi (Hollnagell, 1998), beban kerja (Boring & Blackman, 2007), stres dan pemicu stres (Whaley et al., 2011) merupakan faktor yang mempengaruhi keandalan operator. Kajian keandalan manusia juga dilakukan (Bye,

2023) dalam lingkup ruang kontrol PLTN menemukan bahwa kerja tim dan faktor organisasi dapat diintegrasikan kedalam keandalan manusia. Menurut (Porthin Markus et al., 2016) untuk mengetahui keandalan manusia dalam ruang lingkup digital diperlukan faktor pembentuk kinerja (*Performance Shapping Factor*) yang mendukung sistem digital. Sejalan dengan Porthin, (Zou et al., 2017) dalam penelitiannya menemukan dampak digitalisasi *main control room* (MCR) pada beban kognitif operator mengalami perubahan besar dibandingkan dengan *main control room* tradisional.

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 kontrol PLTN menemukan bahwa sistem pendukung keputusan dalam sistem yang kompleks dapat mengurangi beban kerja operator ruang kontrol. Seperti ruang kontrol JMTO yang memiliki sistem yang kompleks, Kesalahan operator JMTO 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 kontrol JMTO. 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 ruang kontrol JMTO.

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). 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).

Berbagai metode analisis keandalan manusia (HRA) telah dirancang untuk memprediksi kemungkinan terjadinya kesalahan manusia dalam pelaksanaan tugas. Metode ini mengestimasi probabilitas kesalahan berdasarkan tindakan serta keputusan pekerja, dengan memanfaatkan pendekatan rekayasa sistem, ilmu kognitif, dan perilaku untuk mengevaluasi serta menilai dampak aktivitas manusia terhadap keselamatan dan keandalan sistem. (Knisely et al., 2020) meneliti human reliability di ruang kontrol industri petrokimia menggunakan metode CREAM dan HTA menemukan faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kesalahan operator, berkurangnya pemberdayaan, kondisi kerja, multitasking, pelatihan yang tidak memadai, serta waktu yang tersedia untuk bekerja. Peneliti (Laux & Plott, 2007) dalam penelitiannya menjelaskan pendekatan NASA-TLX dan VACP untuk memperoleh data beban kerja operator guna menginformasikan analisis keandalan manusia (HRA). Untuk ATHEANA, data TLX dan VACP dapat dengan mudah dimasukkan sebagai pertimbangan tambahan dalam proses analisis. (Wahyuning & Atiko, 2022) dalam penelitiannya memprediksi human reliability bedasarkan waktu istirahat (pengaruh tingkat beban kerja fisik).

Pentingnya mengintegrasikan beban kerja ke dalam analisis keandalan manusia karena beban kerja (mental, visual, atau fisik) sering menjadi penyebab

tersembunyi dari kesalahan manusia. Mengintegrasikan beban kerja ke dalam analisis keandalan membantu mengungkap faktor penyebab utama dan memberikan solusi yang lebih efektif (Wickens et al., 2022).

Berdasarkan uraian diatas, perlu adanya model keandalan kognitif operator di JMTO yang bertujuan untuk mendukung kinerja optimal, meningkatkan keselamatan dan memastikan efisiensi operasional. Model keandalan kognitif operator berfokus pada elemen-elemen Tugas operator, faktor-faktor penyebab kesalahan, Interaksi manusia-mesin dan lingkungan kerja yang tujuannya untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan operator JMTO.

Dalam penelitian ini akan menggunakan metode *Cognitive Reliability and Error Analysisi Methode* (CREAM) untuk analisis keandalan manusia dan mengintegrasikan pengukuran beban kerja menggunakan metode *Visual Auditory Cognitive Psycomotor* (VACP), dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dengan kombinasi CREAM, VACP dan, FMEA tidak hanya memberikan pemahaman mendalam mengenai hubungan antara beban kerja dan keandalan manusia dan memperkuat analisis keandalan manusia juga memungkinkan perencanaan intervensi untuk meningkatkan keselamatan dan kinerja operator di lingkungan kerja yang kompleks seperti ruang kontrol JMTO.

1.2 Rumusan Masalah

Hingga akhir tahun 2023 total jalan tol yang beroperasi di Indonesia adalah 2.839 Kilometer (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 kontrol jalan tol menjadi sangat penting untuk operasional jalan tol. Digitalisasi sistem pada ruang kendali dapat meningkatkan efisiensi namun juga berpotensi menimbulkan tantangan baru.

Operator ruang kontrol JMTO memiliki beban kerja tinggi karena mereka dituntut untuk *multitasking* memantau beberapa layar CCTV, sistem sensor serta berkoodinasi dengan tim lapangan secara bersamaan. Operator ruang kontrol JMTO juga dituntut untuk merespon dengan cepat insiden dalam hitungan detik/menit untuk meminimalkan dampak. Keterlambatan penanganan insiden/ pelaporan insiden dikarenakan sarana bertukar informasi tertutup dengan informasi yang lain.

Evaluasi beban kerja operator ruang kontrol JMTO dengan metode VACP (*Visual, Auditory, Cognitive, Psychomotor*) menunjukkan bahwa modalitas Visual memiliki beban kerja tertinggi dengan skor 57,2 diikuti oleh modalitas Kognitif yang mencapai 45,5. Sementara itu, modalitas Auditori dan Psikomotor masing-masing memiliki skor 14,9 dan 37,9. Menurut (Mitchell, 2000) (Rusnock, 2016) (Lu et al., 2023), tingkat beban kerja ditentukan oleh total permintaan tugas pada setiap saluran, dengan nilai ambang batas sebesar 40.

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 maintenance 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 memukan 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 kontrol JMTO, 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 tingkat beban kerja yang dialami oleh operator ruang kontrol JMTO?
2. Apa saja potensi *hazard* yang dapat meningkatkan resiko terjadinya human error pada operator ruang kontrol JMTO?
3. Bagaimana mitigasi resiko kesalahan operator guna meminimalkan kesalahan manusia dalam ruang kontrol JMTO?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan keandalan operator ruang kontrol JMTO dengan mengusulkan model mitigasi *human error* dalam lingkungan ruang kontrol jalan tol. Tujuan tersebut akan dicapai melalui: Menganalisis beban kerja yang dialami operator JMTO, Mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan operator dalam ruang kontrol JMTO, Mengintegrasikan metode *Visual auditory Cognitive Psykomotor* (VACP), *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan metode *Cognitive Reliability and Error Analysis Methode* (CREAM) untuk keandalan operator ruang kontrol JMTO.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini berfokus pada :

1. Analisis keandalan manusia dalam ruang kendali digital Jasa Marga Tollroad Operator (JMTO) dengan integrasi metode beban kerja kognitif VACP.

2. Ruang kendali JMTO yang menjadi objek dalam penelitian ini adalah Ruang kendali Pusat JMTO yang beralamat Jl. Galaxy I No.18, RT.004/RW.001, Jaka Mulya, Kec. Bekasi Sel., Kota Bks, Jawa Barat 17146

1.5 Kebaruan Penelitian

Sebagian besar penelitian dalam bidang keandalan manusia menganalisis beban kerja secara keseluruhan (Ntuen et al., 2007)(Gregoriades et al., 2008) (Tropschuh et al., 2022) tanpa memisahkan kontribusi dari masing-masing modalitas. Pendekatan ini memberikan gambaran umum tetapi kurang mampu mengidentifikasi area kritis yang memerlukan perhatian khusus. Berbeda dengan penelitian terdahulu, studi ini menggunakan metode VACP untuk mengevaluasi beban kerja berdasarkan empat modalitas utama: visual, auditori, kognitif, dan psikomotor. Dengan pendekatan ini, penelitian ini dapat mengungkap bahwa modalitas mana yang mengalami kelebihan beban paling tinggi, yang tidak terlihat dalam analisis beban kerja secara menyeluruh.

Potensi kebaruan penelitian ini terletak pada ruang lingkup studi (beban kerja, analisis resiko dan keandalan manusia. Kebaharuan pada metodologi dengan mengintegrasikan metode VACP untuk beban kerja, FMEA untuk analisis resiko kegagalan dan CREAM untuk keandalan manusia.

1.6 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 JMTO untuk meningkatkan keselamatan dan kinerja sistem.

1.7 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 2 Studi Literatur

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 Studi literatur

2.1.1 Analisis Meta Data

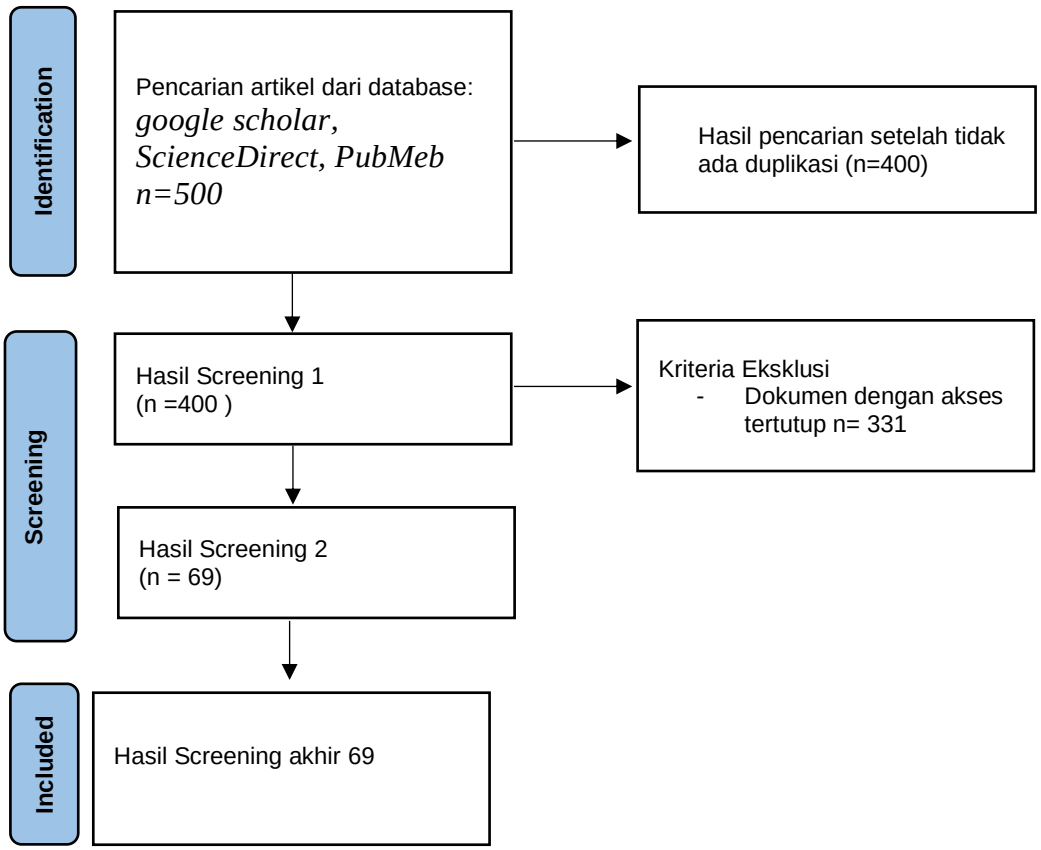
Studi literatur pada penelitian menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review (SLR),* Metode untuk menyusun bukti ilmiah guna menjawab pertanyaan penelitian secara transparan dan dapat direplikasi, dengan berupaya mencakup semua bukti yang telah dipublikasikan terkait topik tersebut serta mengevaluasi kualitas dari bukti tersebut (Lame, 2019) yang memungkinkan setiap langkah dalam menentukan posisi penelitian dijelaskan secara terstruktur dan sistematis. Untuk melakukan studi literatur diawali dengan memanen metadata bibliografi menggunakan Publish or Perish (PoP) 8 dengan mengakses koleksi database *google scholar, ScienceDirect, Pubmed* dari tahun 2019-2025. Pencarian literatur menggunakan kata kunci *Human Reliability, Human Error in complex System, Mitigation Human Error*.

Tabel 2.1 Hasil Pencarian Berdasarkan Kata Kunci

No	Kata Kunci	Jumlah Artikel
1.	*Human Factors and Reliability*	100
2.	*Human Error in complex System*	100
3.	*Mitigation Human Error*	200
4.	*Human reliability on control room*	100
	Jumlah	500

Setelah pencarian literatur dilanjutkan dengan proses screening paper dengan tahapan seleksi yaitu *Identification, Screening, include(Moher et al., 2009).* Hasil penyaringan makalah berdasarkan semua kata kunci dilakukan untuk

mengidentifikasi jumlah makalah yang akan dipilih. Proses ini menggunakan diagram PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) untuk menentukan jumlah makalah yang memenuhi syarat dalam SLR, sesuai dengan kata kunci yang digunakan. Gambar 2.1 menunjukkan alur tahapan proses PRISMA pada penelitian ini.



Gambar 2.1PRISMA Flow Diagram

Gambar 2.1 menunjukkan alur tahapan proses literatur dalam penelitian ini. Tahap *identification* adalah pencarian artikel dari *data base google scholar, ScienceDirect,* diperoleh 500 artikel. Selanjutnya diidentifikasi artikel artikel yg tidak ada duplikasi sebanyak 400 artikel. Kemudian screening awal dari 380 artikel terdapat artikel yang tidak bisa dibuka sebanyak 331 artikel, maka hasil screening akhir diperoleh 69 artikel.

Hasil dari studi literatur diatas adalah tudi tentang *Human Reliability Assessment* (HRA) telah berkembang secara signifikan, khususnya dalam ruang kontrol industri berisiko tinggi seperti tenaga nuklir (Bye, 2023) (X. Zhang et al., 2024) (Suh et al., 2021)(Bona et al., 2021)(Porthin et al., 2020)(Zou et al., 2017)(P. Liu et al., 2020b) (Laurids Boring, 2016)(Musharraf et al., 2019), industri transportasi kereta api (Fonchang, 2021)(Ciani et al., 2021)(Neves et al., 2024), dan layanan kesehatan (Zheng et al., 2020)(Xu et al., 2024)(Onofrio et al., 2015). Literatur juga menyoroti peran kerangka metodologi seperti CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method)(Babaei Pouya et al., 2018)(Shirali et al., 2019) (Knisely et al., 2020)(Zheng et al., 2020)(X. Zhang et al., 2024a) dalam mengevaluasi keandalan manusia. Metode ini memberikan pendekatan terstruktur untuk menilai kemungkinan kesalahan manusia dalam berbagai kondisi operasional. Selain itu, ruang kontrol utama digital menghadirkan tantangan baru dalam penilaian keandalan manusia. Kompleksitas interaksi manusia-sistem dalam lingkungan seperti ini membutuhkan teknik evaluasi yang lebih canggih. Di sisi lain, transformasi menuju ruang kontrol digital memunculkan tantangan baru yang berkaitan dengan meningkatnya beban kognitif (Zou et al., 2017), ketergantungan terhadap sistem otomatisasi (Janota et al., 2022) , dan kebutuhan akan kesadaran situasional yang tinggi (Gabriela et al., 2018.).

Berdasarkan perkembangan tersebut, peneliti tertarik untuk mengkaji keandalan operator di ruang kontrol JMTO sebagai salah satu lingkungan kerja transportasi yang bersifat kritis, dengan menggunakan pendekatan CREAM. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi potensi kegagalan manusia serta menyusun strategi mitigasi yang relevan untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan operasional di ruang kontrol jalan tol

2.1.2 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 Markus et al., 2016). Keandalan manusia dapat dipengaruhi oleh organisasi, kondisi lingkungan, support, waktu yang tersedia, pengalaman, kolaborasi (Hollnagell, 1998), beban kerja (Boring & Blackman, 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 Markus et al., 2016) menganalisis keandalan manusia dalam ruang kontrol digital di PLTN menghasilkan kesimpulan bahwa diperlukan *performance shapping faktor* (faktor pembentuk kinerja) yang bersifat gital 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.

2.1.3 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 sangat 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)

2.1.4 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. Proses ini dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan dan situasi eksternal yang dinamis, sambil juga dipengaruhi oleh karakteristik internal statis tertentu dari operator manusia. Contohnya, menghadapi tuntutan dari tugas yang statis memerlukan usaha dan perhatian penuh dari individu. Teknologi modern telah mengurangi kebutuhan akan pekerjaan fisik, namun pada saat yang sama, telah meningkatkan tuntutan pekerjaan mental yang tidak dapat dilakukan oleh operator di bidang kontrol dalam persaingan industri (Ghanavati et al., 2019).

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).

2.1.5 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. 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.

2.1.6 *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) merupakan metode yang umum digunakan dalam penilaian risiko serta berbagai strategi pengendalian kualitas. Untuk mendapatkan efisiensi sistem produksi, FMEA berguna untuk mendapatkan efisiensi sistem produksi (Salah et al., 2023). Pendekatan sistematis yang diterapkan dalam FMEA memungkinkan organisasi untuk mengidentifikasi potensi kegagalan, yang kemudian diprioritaskan berdasarkan tingkat risikonya guna memastikan langkah mitigasi yang lebih efektif. Namun, FMEA tradisional sering kali belum mampu menangkap seluruh faktor kegagalan secara menyeluruh dan masih bergantung pada pendapat ahli yang bersifat subjektif. Kelebihan metode FMEA adalah membantu mengidentifikasi potensi kegagalan sebelum terjadi, memungkinkan tindakan pencegahan (Liou et al., 2024) yang memiliki sifat sistematis FMEA memberikan kerangka kerja yang jelas untuk mengevaluasi risiko, yang bermanfaat dalam lingkungan yang kompleks (Vecchia et al., 2025).

2.1.7 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).

2.1.8 Posisi Penelitian

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan 3 ruang lingkup studi yaitu Beban Kerja, Penilaian Resiko dan H*uman Reliability*.Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, studi-studi terdahulu yang mengkaji aspek keandalan manusia menitik beratkan pada satu atau dua dari tiga ruang lingkup. Dalam konteks ruang kontrol jalan tol merupakan sistem kerja yang kompleks, dinamis dan beresiko tinggi, interaksi antara beban kerja operator, evaluasi terhadap resiko kegagalan operasional serta faktor-faktor keandalan manusia sangat penting untuk menjamin keselamatan pengguna jalan tol.

Dengan demikian, studi ini tidak hanya melengkapi penelitian terdahulu, tetapi juga berkontribusi dalam meningkatkan keselamatan serta efisiensi operasional dalam pengelolaan jalan tol di Indonesia.

Tabel 2.2 Posisi Penelitian berdasarkan ruang lingkup studi

No	Penulis	Ruang lingkup study		
		Workload	Risk Assesment	Human Reliability Analysis
1	(Ntuen & Park, 2007)	✓		✓
2	(Kennedy et al., 1998)		✓	
3	(De Felice et al., 2016)		✓	✓
4	(Pan et al., 2017)	✓		✓
5	(P. Liu et al., 2017)		✓	✓
6	(Babaei et al., 2018)			✓
7	(Zhou et al., 2018)			✓
8	(Shirali et al., 2019)			✓
9	(Knisely, et al., 2020)			✓
10	(Zheng et al., 2020b)			✓
11	(Tavakoli & Nafar, 2020)		✓	✓
12	(Bona et al., 2021)			✓
13	(Maternová et al., 2023)		✓	✓
14	(Materna et al., 2023)		✓	✓
15	(Z. Wang et al., 2023)	✓	✓	
16	(Bafandegan et al., 2024)			✓
17	(Modares et al., 2024)			✓
18	(Yao et al., 2022)			✓
19	(Birch et al., 2023)		✓	✓
20	(Ahn & Kurt, 2020)			✓
21	(X. Zhang et al., 2024b)			✓
22	(X. Liu et al., 2024)		✓	✓
23	(Aliabadi et al., 2024)		✓	✓
24	(Costantino et al., 2024)		✓	✓
25	(C. Zhang et al., 2019)			✓
26	**Penelitian ini**	✓	✓	✓

Tabel 2.3 Posisi Penelitian Berdasarkan Metode yang digunakan

No	Penulis	Metode/Pendekatan		
		CREAM	FMEA	VACP
1.	(Ltc et al., 1991)			✓
2.	(Mitchell, 2000)			✓
3.	(Rusnock et al., 2016)			✓
4.	(Huang et al., 2023)			✓
5.	(Sun et al., 2024)			✓
6.	(Babaei et al., 2018)	✓		
7.	(Zhou et al., 2018)	✓		
8.	(Shirali et al., 2019)	✓		
9.	(Knisely, et al., 2020)	✓		
10.	(Zheng et al., 2020b)	✓		
11.	(Bafandegan et al., 2024)	✓		
12.	(Modares et al., 2024)	✓		
13.	(Yao et al., 2022)	✓		
14.	(D. Wang et al., 2024)	✓		

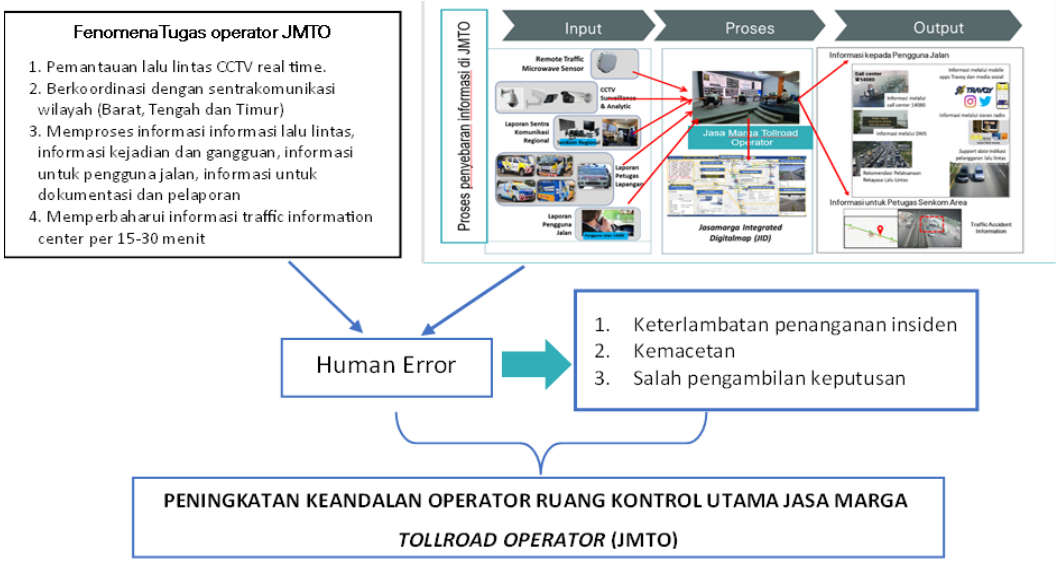
No	Penulis	Metode/Pendekatan		
		CREAM	FMEA	VACP
15.	(Ahn & Kurt, 2020)	✓		
16.	(X. Zhang et al., 2024)	✓		
17.	(C. Zhang et al., 2019)	✓		
18.	(Salah et al., 2023)		✓	
19.	(Arvanitoyannis et al., 2008)		✓	
20.	(Vecchia et al., 2025)		✓	
21.	(Meziane et al., 2023)		✓	
24.	**Penelitian ini**	✓	✓	✓

Bab 3 Metodologi Penelitian

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

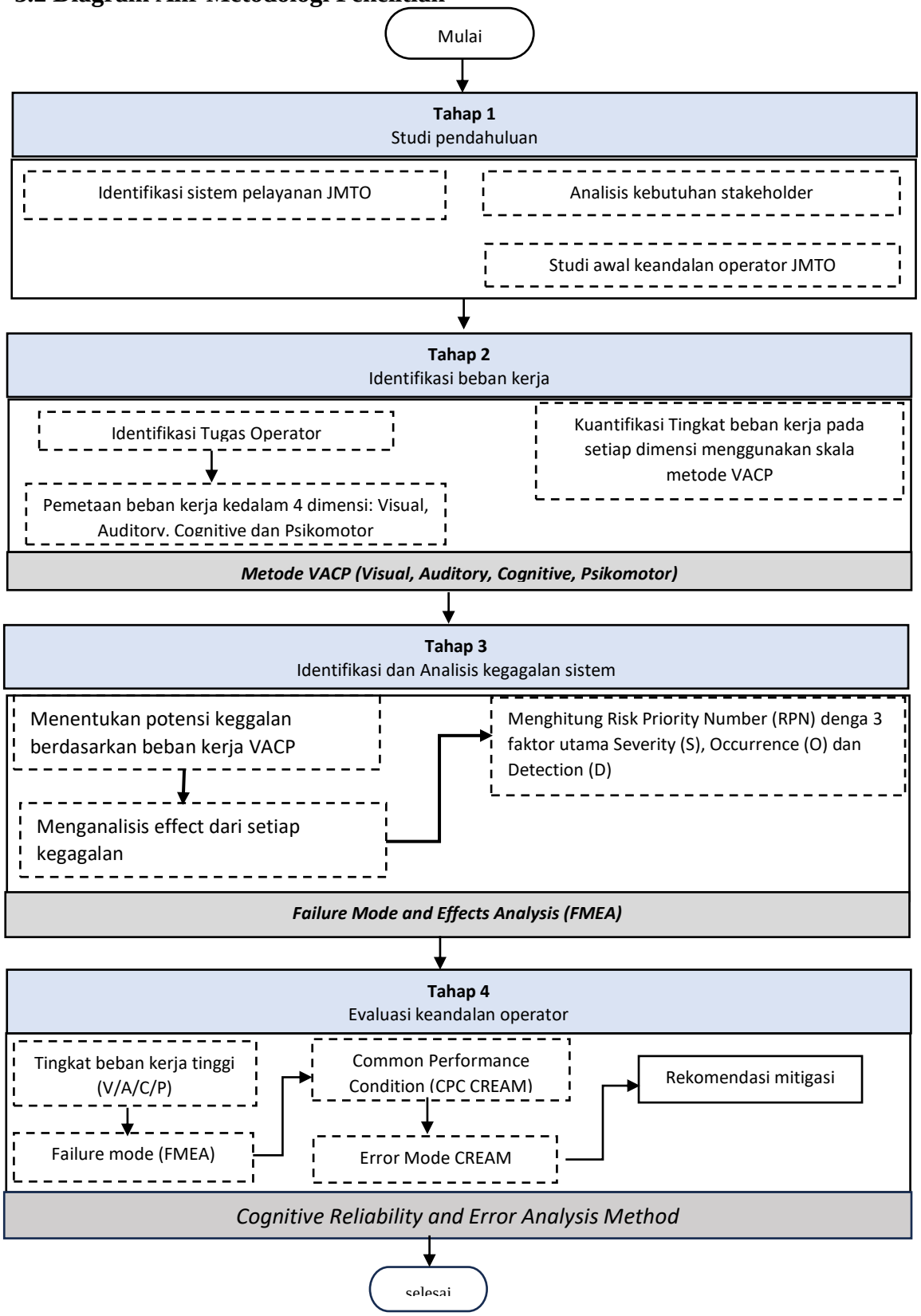
3.1 Kerangka Berpikir

Tugas operator JMTO 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 JMTO 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 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

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 JMTO	Dokumentasi, studi literatur, observasi langsung, wawancara,	Sistem pelayanan JMTO
	2. Analisis kebutuhan Stakeholder	FGD, Wawancara	Kebutuhan Stakeholder JMTO
	3. Studi awal keandalan operator	Analisis Fase tindakan kognitif operator	
Tahap 2	1. Identifikasi Tugas Operator	Observasi, Wawancara dengan operator, meninjau SOP, struktur tugas dan tanggung jawab operator	HTA
	2. Pengukuran beban kerja	Metode VACP	Beban kerja tertinggi berdasarkan 4 modalitas VACP
Tahap 3	1. Identifikasi potensi kegagalan system	Observasi, wawancara dan diskusi dengan operator dan supervisor, analisis dokumentasi insiden dan laporan kejadian	Potensi kegagalan sistem
	2. Analisis Resiko	Metode FMEA	Risk Priority Number (RPN)
Tahap 4	Analisis Keandalan Operator	Metode CREAM	Mitigasi resiko kesalahan operator

Penelitian dimulai dengan **Tahap 1: Studi Pendahuluan**

Pada tahap ini, dilakukan analisis awal untuk memahami sistem pelayanan JMTO dan kondisi operator. Ada tiga langkah utama dalam tahap ini:

Penelitian dimulai dengan **Tahap 1: Studi Pendahuluan**

Pada tahap ini, dilakukan analisis awal untuk memahami sistem pelayanan JMTO dan kondisi operator. Ada tiga langkah utama dalam tahap ini:

1. Identifikasi Sistem Pelayanan JMTO mengkaji bagaimana sistem operasional jalan tol berjalan, termasuk struktur organisasi, SOP, teknologi yang digunakan, serta lingkungan kerja operator.
2. Analisis Kebutuhan Stakeholder dengan mengidentifikasi kebutuhan dan harapan stakeholder (manajemen JMTO, operator jalan tol, pengguna jalan, serta pihak lain yang terkait) terhadap sistem dan operator yang andal.

3. Studi Awal Keandalan Operator JMTO mengkaji peran operator dalam sistem JMTO serta potensi faktor yang mempengaruhi keandalan mereka. Mengumpulkan data awal melalui observasi, wawancara, dan analisis dokumentasi.

Tahap 2: Identifikasi Beban Kerja

Pada tahap ini, beban kerja operator dianalisis berdasarkan berbagai aspek untuk memahami tingkat tekanan yang dialami. Identifikasi Tugas Operator dengan Menganalisis tugas-tugas yang harus dilakukan operator dalam sistem JMTO, termasuk pengawasan lalu lintas, pengelolaan insiden, serta komunikasi dengan pengguna jalan dan pihak lain. Pemetaan Beban Kerja OperatorBeban kerja dikategorikan berdasarkan dimensi Visual: Seberapa banyak informasi visual yang harus diproses (misalnya, pemantauan CCTV dan tampilan kontrol). Auditory: Seberapa sering operator harus menangani informasi melalui pendengaran (misalnya, komunikasi radio atau telepon). Cognitive: Seberapa kompleks pemrosesan informasi dan pengambilan keputusan yang harus dilakukan. Psikomotor: Seberapa banyak aktivitas fisik yang dilakukan (misalnya, mengoperasikan perangkat kontrol). Kuantifikasi Tingkat Beban Kerja Menentukan tingkat beban kerja dalam setiap dimensi menggunakan metode VACP (*Visual, Auditory, Cognitive, Psikomotor*), yang memberikan skala kuantitatif untuk mengukur beban kerja operator.

Tahap 3: Identifikasi dan Analisis Kegagalan Sistem

Pada tahap ini, dilakukan analisis terhadap potensi kegagalan yang dapat terjadi dalam sistem JMTO akibat beban kerja operator. Menentukan Potensi Kegagalan berdasarkan analisis beban kerja yang telah dilakukan menggunakan metode VACP, potensi kegagalan diidentifikasi dan diklasifikasikan. Menganalisis Effect dari Setiap Kegagalan menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan dan dampaknya terhadap sistem. Menghitung *Risk Priority Number* (RPN) Risiko dari setiap kegagalan dihitung menggunakan RPN, yang didasarkan pada tiga faktor utama: *Severity* (S): Tingkat keparahan kegagalan terhadap sistem. *Occurrenc*e (O): Seberapa sering

kegagalan tersebut terjadi. *Detection* (D): Seberapa mudah kegagalan dapat dideteksi sebelum berdampak besar.

Tahap 4: Evaluasi Keandalan Operator

Tahap akhir penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan operator dalam menghadapi berbagai faktor beban kerja dan risiko yang telah diidentifikasi. Tingkat Beban Kerja Tinggi (V/A/C/P) Menggunakan metode VACP untuk mengukur bagaimana tingkat beban kerja yang tinggi memengaruhi performa operator. *Common Performance Condition* (CPC CREAM) Menggunakan model *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM) untuk menilai kondisi kerja operator berdasarkan faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja mereka. Failure Mode (FMEA) dan Error Mode (CREAM) Kombinasi metode FMEA dan CREAM digunakan untuk mengidentifikasi pola kesalahan dan menentukan mitigasi yang sesuai guna meningkatkan keandalan operator.Rekomendasi Perbaikan Berdasarkan hasil analisis, rekomendasi diberikan untuk mengurangi risiko kesalahan operator, meningkatkan efisiensi kerja, dan meningkatkan keselamatan serta keandalan sistem JMTO.

3.3 Rencana Penelitian

Objek penelitian ini adalah JMTO Jasamarga berlokasi di Jati Asih. Adapun rentang waktu penelitian dilakukan selama 24 bulan dari bulan Maret 2024 hingga Maret 2026.

Tabel 3.4 Rencana Penelitian

Kegiatan	Tahun 1												Tahun2												Tahun 3										
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
studi Literatur																																					
Ujian Kualifikasi																																					
Penyusunan Proposal Disertasi																																					
Sidang Proposal																																					
Publikasi 1																																					
Pengurus izin penelitian lapangan																																					
Penelitian lapangan																																					
- pengambilan data beban kerja fisik																																					
- pengambilan data beban kerja menggunakan EEG																																					
Seminar Kemajuan 1																																					
Seminar Kemajuan 2																																					
Seminar kemajuan 3																																					
Penyusunan draft Disertasi																																					
Sidang ujian Disertasi tertutup																																					
Sidang terbuka/promosi doktor																																					

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

Ahn, S. Il, & Kurt, R. E. (2020). Application of a CREAM based framework to assess human reliability in emergency response to engine room fires on ships. *Ocean Engineering*, *216*, 108078. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.108078

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/

Arvanitoyannis, I. S., & Varzakas, T. H. (2008). Application of ISO 22000 and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) for industrial processing of salmon: A case study. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *48*(5), 411–429. https://doi.org/10.1080/10408390701424410

Babaei Pouya, A., Esmaeili, F., & Jamali, Z. (2018). *Risk and Human Reliability Assessments at a Tool Factory and Control Suggestions* (Vol. 12, Issue 2).

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. (2024a). 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

Bafandegan Emroozi, V., Modares, A., & Roozkhosh, P. (2024b). 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

Braarud, P. Ø. (2024). Measuring cognitive workload in the nuclear control room: a review. *Ergonomics*, 1–17. https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2302381

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

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. (1994). *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 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

Gabriela, T., Ioan Mircea, G., Maria Helga, S., & Dan George, T. (n.d.). *A Model-Based Approach for Human Reliability Analysis in the Decision Management of Complex Systems*.

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

Gregoriades, A., & Sutcliffe, A. (2008). Workload prediction for improved design and reliability of complex systems. *Reliability Engineering and System Safety*, *93*(4), 530–549. https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.02.001

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

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

Huang, Y., Zhang, N., & Li, Z. (2023). Generalizability of Mental Workload Prediction Using VACP Scales in Different Fields. In D. Harris & W.-C. Li (Eds.), *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 79–94). Springer Nature Switzerland.

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

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*.

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., & ... (2020a). A cognitive decomposition to empirically study human performance in control room environments. *International Journal of …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581920300409

Knisely, B. M., Joyner, J. S., Rutkowski, A. M., Wong, M., & ... (2020b). A cognitive decomposition to empirically study human performance in control room environments. *International Journal of …*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581920300409

Knisely, B. M., Joyner, J. S., Rutkowski, A. M., Wong, M., Barksdale, S., Hotham, H., Kharod, K., & Vaughn-Cooke, M. (2020). 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).

Lame, G. (2019). Systematic literature reviews: An introduction. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED*, *2019-August*, 1633–1642. https://doi.org/10.1017/dsi.2019.169

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

Laurids Boring, R. (2016). *METHODS AND MEASURES FOR CHARACTERIZING NUCLEAR POWER PLANT OPERATOR PERFORMANCE TO SUPPORT CONTROL ROOM MODERNIZATION*. www.psam13.org

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

Liou, J. J. H., Guo, B. H. T., Huang, S.-W., & Yang, Y.-T. (2024). Failure Mode and Effect Analysis Using Interval Type-2 Fuzzy and Multiple-Criteria Decision-Making Methods. *Mathematics*, *12*(24), 3931. https://doi.org/10.3390/math12243931

Liu, P., Lyu, X., Qiu, Y., He, J., Tong, J., Zhao, J., & Li, Z. (2017). Identifying key performance shaping factors in digital main control rooms of nuclear power plants: A risk-based approach. *Reliability Engineering and System Safety*, *167*, 264–275. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.06.002

Liu, P., Qiu, Y., Hu, J., Tong, J., Zhao, J., & Li, Z. (2020a). 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

Liu, P., Qiu, Y., Hu, J., Tong, J., Zhao, J., & Li, Z. (2020b). 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

Liu, X., Yan, S., Zhang, X., & Ahmed, W. (2024). Dynamic human reliability analysis method for nuclear power plant main control room based on SPAR-H and SD. *Nuclear Engineering and Technology*. https://doi.org/10.1016/j.net.2024.10.015

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

Ltc, E., Bierbaum, C. R., & Hamilton, D. B. (1991). *AD-A237 500 Task Analysis and Workload Prediction for the MH-47E Mission and a Comparison with CH-47D Workload Predictions Volume I: Summary Report*.

Lu, X., Guo, J., Zeng, S., & Che, H. (2023). Mental Overload Assessment Method Considering the Effects of Performance Shaping Factors. *IEEE Access*, *11*, 48375–48391. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3277254

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

Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., Török, A., & Švábová, L. (2023). Human Error Analysis and Fatality Prediction in Maritime Accidents. *Journal of Marine Science and Engineering*, *11*(12). https://doi.org/10.3390/jmse11122287

Meziane, S., Taous, M., & Bourkhiss, B. (2023). Mitigating the risk of COVID-19 infection in the operating room: Using healthcare failure mode and effect analysis. *Perioperative Care and Operating Room Management*, *31*. https://doi.org/10.1016/j.pcorm.2023.100319

Mitchell, D. K. (2000). *Mental Workload and ARL Workload Modeling Tools 20000518 033 ÜTIC QUALITY INSPECTED Ö*.

Modares, A., Bafandegan Emroozi, V., Gholinezhad, H., & Modares, A. (2024). An integrated Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) and optimization for enhancing human reliability in blockchain. *Decision Analytics Journal*, *12*. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100506

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. In *BMJ (Online)* (Vol. 339, Issue 7716, pp. 332–336). https://doi.org/10.1136/bmj.b2535

Musharraf, M., Moyle, A., Khan, F., & Veitch, B. (2019). Using Simulator Data to Facilitate Human Reliability Analysis. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, *141*(2). https://doi.org/10.1115/1.4042538

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

Neves, G., Ribeiro, G., Grilo, M., Infante, V., & Andrade, A. R. (2024). Human reliability and Organizational factors—How do Human Factors contribute to

Signals Passed at Danger? *Safety Science*, *171*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106395

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. (2007a). *PREDICTING HUMAN RELIABILITY UNDER WORKLOAD AND SKILL PERFORMANCE*. https://doi.org/10.1109/AUIC

Ntuen, C. A., & Park, E. H. (2007b). *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, Issue 52656). www.nrc.gov/NRC/ADAMS/index.html.

Onofrio, R., Trucco, P., & Torchio, A. (2015a). 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

Onofrio, R., Trucco, P., & Torchio, A. (2015b). 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

Pan, X., Lin, Y., & He, C. (2017). A Review of Cognitive Models in Human Reliability Analysis. In *Quality and Reliability Engineering International* (Vol. 33, Issue 7, pp. 1299–1316). John Wiley and Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/qre.2111

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 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*.

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. (2024). 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. (2016a). *Workload Profiles: A Continuous Measure of Mental Workload*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814116301287

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

Salah, B., Alnahhal, M., & Ali, M. (2023). Risk prioritization using a modified FMEA analysis in industry 4.0. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, *11*(4), 460–468. https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.07.001

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

Suh, Y. A., Kim, J., & Park, S. Y. (2021). Time uncertainty analysis method for level 2 human reliability analysis of severe accident management strategies.

Nuclear Engineering and Technology, *53*(2), 484–497. https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.028

Sun, J., Yu, S., Chu, J., Cun, W., Wang, H., Chen, C., Li, F., & Huang, Y. (2024). A crew task allocation and sequencing method considering workload distribution and minimum task completion time. *Kybernetes*. https://doi.org/10.1108/K-01-2024-0096

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

Tavakoli, M., & Nafar, M. (2020). Human reliability analysis in maintenance team of power transmission system protection. *Protection and Control of Modern Power Systems*, *5*(1). https://doi.org/10.1186/s41601-020-00176-6

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

Vecchia, M., Sacchi, P., Marvulli, L. N., Ragazzoni, L., Muzzi, A., Polo, L., Bruno, R., & Salio, F. (2025). Healthcare Application of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA): Is There Room in the Infectious Disease Setting? A Scoping Review. In *Healthcare (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/healthcare13010082

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

Wahyuning, C. S., & Atiko, S. (2022). Predicting Human Reliability based on Individual's Resting Period: Effect of Physical Workload Rate. *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, *21*(2), 66–74. https://doi.org/10.25077/josi.v21.n2.p66-74.2022

Wang, D., Yang, G., Han, J., Duo, Y., Zhou, X., & Tong, R. (2024). Quantitative assessment of human error of emergency behavior for hazardous chemical spills in chemical parks. *Process Safety and Environmental Protection*, *189*, 930–949. https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2024.06.107

Wang, Z., Wang, W., Chen, J., Zhang, X., & Miao, Z. (2023). Posture Risk Assessment and Workload Estimation for Material Handling by Computer Vision. *International Journal of Intelligent Systems*, *2023*. https://doi.org/10.1155/2023/2085251

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, Helton, Hollans, & Banbury. (2022). *Engineering Psychology and Human Performance*.

wilhelmsen, C., Gertman, D., Lee, William, N., & William J. (1992). THE IMPACT OF ANVANCED CONTROL ROOM TECHNOLOGY. *EG and Idaho Falls,ID*.

Xu, X. G., Zhang, L., Wang, S. X., Gong, H. P., & Liu, H. C. (2024). An Integrated CREAM for Human Reliability Analysis Based on Consensus Reaching Process under Probabilistic Linguistic Environment. *Systems*, *12*(7). https://doi.org/10.3390/systems12070249

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

Yao, K., Yan, S., & Tran, C. C. (2022). A Fuzzy CREAM Method for Human Reliability Analysis in Digital Main Control Room of Nuclear Power Plants. *Nuclear Technology*, *208*(4), 761–774. https://doi.org/10.1080/00295450.2021.1947123

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, C., Gao, W., Yang, T., & Guo, S. (2019). Opportunistic maintenance strategy for wind turbines considering weather conditions and spare parts inventory management. *Renewable Energy*, *133*, 703–711. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.10.076

Zhang, X., Yan, S., & Liu, X. (2024a). 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., Yan, S., & Liu, X. (2024b). 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

Zheng, X., Bolton, M. L., Daly, C., & Biltekoff, E. (2020a). 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

Zheng, X., Bolton, M. L., Daly, C., & Biltekoff, E. (2020b). 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

Zhou, Q., Wong, Y. D., Loh, H. S., & Yuen, K. F. (2018). A fuzzy and Bayesian network CREAM model for human reliability analysis – The case of tanker shipping. *Safety Science*, *105*, 149–157. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.011

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