

ERGONOMIKA



Disusun oleh:

M. Anyar Bora, Andi Haslinda, Ahmad Hanafie, Monita Rahayu,
Luki Hernando, Lukman Handoko, Tri Wisudawati
Widhy Wahyani, Rini Puspita Dewi

ERGONOMIKA

**M. Anyar Bora
Andi Haslinda
Ahmad Hanafie
Monita Rahayu
Luki Hernando
Lukman Handoko
Tri Wisudawati
Widhy Wahyani
Rini Puspita Dewi**



GET PRESS INDONESIA

ERGONOMIKA

Penulis :

M. Anyar Bora
Andi Haslinda
Ahmad Hanafie
Monita Rahayu
Luki Hernando
Lukman Handoko
Tri Wisudawati
Widhy Wahyani
Rini Puspita Dewi

ISBN : 978-634-255-697-9

Editor : Diana Purnama Sari, SE., ME.

Desain Sampul dan Tata Letak : Mila Sari, M. Si.

PENERBIT : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah

Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat

website: www.getpress.co.id

email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Ergonomika* ini dapat diselesaikan. Isi buku ini mencakup pembahasan tentang hakikat ergonomika, sejarah hingga tantangan dan arah masa depan ergonomika. Kemudian juga membahas antropometri dalam perancangan system kerja, biomekanika kerja dan manual material handling, fisiologi kerja dan analisis beban kerja fisik, human information processing dalam ergonomika, beban kerja mental dan pengukuran kognitif serta human error dan keselamatan system kerja. Tidak kalah penting juga membahas lingkungan kerja dan pengaruhnya terhadap kinerja dan aplikasi ergonomika dalam perancangan dan perbaikan system kerja. Akhir kata, semoga buku ini dapat menjadi referensi dan dapat memberikan manfaat serta inspirasi bagi semua pembaca.

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	vi
BAB 1 PENGANTAR ERGONOMIKA.....	1
1.1 Hakikat dan Definisi Ergonomika	1
1.2 Landasan Filosofis dan Epistemologis Ergonomika	5
1.3 Sejarah dan Evolusi Ergonomika dalam Konteks Global	9
1.4 Ergonomika sebagai Ilmu Interdisipliner.....	13
1.5 Tujuan Strategis dan Paradigma Ergonomika Modern	16
1.6 Prinsip Fundamental dalam Ergonomika	20
1.7 Tantangan dan Arah Masa Depan Ergonomika	23
BAB 2 ANTROPOMETRI DALAM PERANCANGAN SISTEM KERJA	29
2.1 Pengertian Antropometri	30
2.2 Tujuan dan Manfaat Antropometri	31
2.3 Jenis-Jenis Antropometri	32
2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Antropometri.....	34
2.5 Prinsip-prinsip Penggunaan Data Antropometri.....	35
2.6 Persentil Dalam Ergonomi.....	36

2.7 Pengukuran Antropometri	38
2.8 Integrasi Antropometri dan Ergonomi.....	42
DAFTAR PUSTAKA.....	44
BAB 3 BIOMEKANIKA KERJA DAN MANUAL	
MATERIAL HANDLING	47
3.1 Pengertian Biomekanika Kerja	48
3.2 Konsep dasar Biomekanika.....	53
3.3 Pengertian Manual Material Handling (MMH)	54
3.4 Prinsip Ergonomi dalam MMH.....	56
3.5 Hubungan Biomekanika, Ergonomi, dan Produktivitas	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
BAB 4 FISILOGI KERJA DAN ANALISIS BEBAN	
KERJA FISIK	69
4.1 Pengantar Fisiologi Kerja dan Ergonomis.....	71
4.2 Sistem Metabolisme dan Konversi Energi Tubuh	76
4.3 Metode Pengukuran dan Analisis Beban Kerja Fisik.....	83
4.4 Analisis Kelelahan Kerja (<i>Fatigue</i>) dan Pemulihan.....	95
DAFTAR PUSTAKA.....	98
BAB 5 HUMAN INFORMATION PROCESSING	
DALAM ERGONOMIKA.....	99
5.1 <i>Human Information Processing</i> dan Ergonomika dalam Sistem Kerja	99
5.2 Konsep Dasar <i>Human Information Processing</i>	105

5.3 Penerapan <i>Human Information Processing</i>	111
5.4 Teknologi Modern dan <i>Human Information Processing</i>	115
DAFTAR PUSTAKA.....	119
BAB 6 BEBAN KERJA MENTAL DAN PENGUKURAN KOGNITIF.....	121
6.1 Konsep Teoretis Beban Kerja Mental	127
6.2 Pengukuran Kognitif	130
6.3 Hubungan Pengukuran Kognitif dan Beban Kerja Mental	133
6.4 Metode Pengukuran Beban Kerja Mental	135
6.5 Metode Pengukuran Kognitif.....	142
6.6 Aplikasi Beban Kerja Mental.....	146
6.7 Hubungan Beban Kerja Mental dan Performa Tugas dalam Ergonomi.....	150
DAFTAR PUSTAKA.....	152
BAB 7 HUMAN ERROR DAN KESELAMATAN SISTEM KERJA.....	161
7.1 Konsep Dasar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).....	163
7.3 Konsep dan Klasifikasi <i>Human Error</i>	171
7.4 Faktor Penyebab <i>Human Error</i>	176
7.5 Studi Kasus dan Aplikasi di Industri.....	177
DAFTAR PUSTAKA.....	181
BAB 8 LINGKUNGAN KERJA FISIK DAN PENGARUHNYA TERHADAP KINERJA	183
8.1 Konsep Lingkungan Kerja Fisik	185

8.2 Kinerja Karyawan.....	189
8.3 Pengaruh Lingkungan Kerja Fisik terhadap Kinerja.....	194
8.4 Studi Empiris Terkini tentang Lingkungan Kerja Fisik.....	198
8.5 Strategi Meningkatkan Lingkungan Kerja Fisik.....	201
8.6 Tantangan dan Tren Masa Depan Lingkungan Kerja.....	205
DAFTAR PUSTAKA.....	209
BAB 9 APLIKASI ERGONOMI DALAM PERANCANGAN DAN PERBAIKAN SISTEM KERJA.....	211
9.1 Sistem Kerja.....	212
9.2 Perancangan dan Perbaikan Sistem Kerja	215
9.3 Aplikasi Perancangan dan Perbaikan Sistem Kerja.....	216
DAFTAR PUSTAKA.....	227
BIODATA PENULIS.....	231

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Klasifikasi Kondisi Sistem Kerja Berdasarkan Dampak Fisiologis dan Konsekuensi terhadap Kerja	75
Tabel 4.2 Perbandingan Karakteristik Metabolisme Basal dan Metabolisme Kerja	79
Tabel 4.3 Evaluasi Beban kerja Fisik Berdasarkan Denyut Jantung.....	88
Tabel 4.4 Klasifikasi Kategori Beban Kerja Berdasarkan Konsumsi Energi.....	89
Tabel 4.5 Klasifikasi Beban Kerja Fisik Berdasarkan Nilai %CVL	93
Tabel 4. 6 Skala RPE.....	94
Tabel 9.1 Perbedaan Dr.Goniometer, Goniometer Pro, dan Angle Meter.....	220

BAB 1

PENGANTAR ERGONOMIKA

Oleh M. Ansyar Bor

1.1 Hakikat dan Definisi Ergonomika

Ergonomika sebagai suatu disiplin ilmu memiliki posisi yang unik dalam khazanah keilmuan modern karena mengintegrasikan berbagai perspektif untuk memahami dan mengoptimalkan interaksi antara manusia dengan sistem di mana ia beraktivitas. Secara etimologis, istilah ergonomika berasal dari bahasa Yunani, yaitu *ergon* yang berarti kerja dan *nomos* yang berarti hukum atau aturan.

Dengan demikian, ergonomika secara sederhana dapat dimaknai sebagai ilmu yang mempelajari aturan-aturan kerja yang berorientasi pada manusia. Namun, pengertian tersebut dalam perkembangannya mengalami perluasan yang signifikan seiring dengan meningkatnya kompleksitas sistem kerja dan kemajuan teknologi (Bora *et al.*, 2026; Iridiastadi & Yassierli, 2014).

Secara konseptual, ergonomika tidak hanya dipahami sebagai upaya untuk menyesuaikan alat atau lingkungan kerja terhadap kemampuan fisik manusia, tetapi juga mencakup aspek kognitif dan organisasi. Salah satu definisi yang paling banyak dirujuk menyatakan bahwa ergonomika adalah disiplin ilmiah yang mempelajari interaksi antara manusia dan elemen lain dalam suatu sistem, serta profesi yang

mengaplikasikan teori, prinsip, data, dan metode untuk merancang sistem guna mengoptimalkan kesejahteraan manusia dan kinerja sistem secara keseluruhan (International Ergonomics Association, 2021). Definisi ini menegaskan bahwa ergonomika tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga preskriptif, yaitu memberikan rekomendasi desain berbasis bukti ilmiah.

Hakikat ergonomika terletak pada pendekatan *human-centered*, yaitu menempatkan manusia sebagai pusat dalam perancangan sistem. Dalam paradigma ini, manusia tidak lagi dipandang sebagai komponen yang harus menyesuaikan diri terhadap mesin atau lingkungan kerja yang kaku, melainkan sebagai entitas yang memiliki keterbatasan dan keunikan yang harus diakomodasi. Pendekatan ini muncul sebagai respons terhadap praktik-praktik awal dalam industrialisasi yang cenderung mengabaikan aspek kemanusiaan, di mana pekerja diposisikan sebagai bagian dari mesin produksi tanpa mempertimbangkan kenyamanan, keselamatan, maupun kesejahtraannya (Bora, Hanafie, Haslindah, *et al.*, 2025; Tarwaka *et al.*, 2014).

Dalam perspektif ilmiah, ergonomika mengkaji berbagai dimensi manusia, termasuk dimensi fisik, kognitif, dan sosial. Dimensi fisik berkaitan dengan karakteristik anatomi, fisiologi, dan biomekanika manusia dalam melakukan aktivitas kerja, seperti postur kerja, kekuatan otot, dan gerakan repetitif. Dimensi kognitif berfokus pada proses mental seperti persepsi, memori, pengambilan keputusan, serta beban kerja mental. Sementara itu, dimensi organisasi mencakup struktur kerja, komunikasi, budaya organisasi, serta faktor-faktor yang memengaruhi interaksi antarindividu

dalam sistem kerja (Bora, Larisang, Hanafie, *et al.*, 2025; Bora, Lawi, *et al.*, 2024; Bridger, 2025).

Dengan demikian, definisi ergonomika tidak dapat dipisahkan dari sifatnya yang multidimensional dan interdisipliner. Ergonomika mengadopsi dan mengintegrasikan konsep dari berbagai disiplin ilmu seperti teknik industri, psikologi, fisiologi, biomekanika, hingga ilmu manajemen. Integrasi ini memungkinkan ergonomika untuk memberikan solusi yang komprehensif terhadap permasalahan kerja yang kompleks, yang tidak dapat diselesaikan melalui pendekatan tunggal.

Lebih lanjut, ergonomika juga memiliki orientasi pada dua tujuan utama yang harus diseimbangkan, yaitu peningkatan kesejahteraan manusia (*human well-being*) dan peningkatan kinerja sistem (*system performance*). Kesejahteraan manusia mencakup aspek keselamatan, kesehatan, kenyamanan, dan kepuasan kerja, sedangkan kinerja sistem berkaitan dengan produktivitas, efisiensi, kualitas, dan keandalan. Dalam praktiknya, kedua tujuan ini sering kali saling mendukung, di mana sistem kerja yang dirancang secara ergonomis cenderung menghasilkan pekerja yang lebih sehat, nyaman, dan produktif (Hanafie & Haslindah, 2021; Lawi *et al.*, 2023).

Hakikat ergonomika juga mencerminkan pergeseran paradigma dari pendekatan tradisional yang berorientasi pada mesin (*machine-centered*) menuju pendekatan yang berorientasi pada manusia (*human-centered systems*). Pergeseran ini semakin relevan dalam konteks perkembangan teknologi modern seperti otomatisasi, kecerdasan buatan, dan sistem digital, di mana interaksi manusia dengan teknologi menjadi semakin kompleks. Dalam konteks ini, ergonomika

berperan penting untuk memastikan bahwa teknologi yang dikembangkan tetap dapat digunakan secara efektif, aman, dan nyaman oleh manusia (Bora, Herman, *et al.*, 2024; Ndari *et al.*, 2025; Salvendy & Karwowski, 2021).

Selain itu, ergonomika juga memiliki dimensi normatif, yaitu memberikan pedoman atau standar dalam perancangan sistem kerja. Standar ergonomika yang dikembangkan oleh berbagai organisasi internasional menjadi acuan penting dalam praktik industri dan penelitian. Standar ini mencakup berbagai aspek, mulai dari desain tempat kerja, alat kerja, hingga sistem interaksi manusia-komputer. Dengan adanya standar tersebut, ergonomika tidak hanya menjadi ilmu yang teoritis, tetapi juga memiliki implikasi praktis yang luas dalam berbagai sektor.

Dalam konteks yang lebih luas, ergonomika juga dapat dipandang sebagai pendekatan untuk mencapai keberlanjutan (*sustainability*) dalam sistem kerja. Dengan memperhatikan keseimbangan antara manusia, teknologi, dan lingkungan, ergonomika berkontribusi dalam menciptakan sistem yang tidak hanya efisien secara ekonomi, tetapi juga berkelanjutan secara sosial dan lingkungan. Hal ini menjadi semakin penting dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, transformasi digital, dan dinamika pasar tenaga kerja (Bora, Hanafie, Andi Haslindah, *et al.*, 2025; Nunes, 2022; Szopa & Soares, 2021).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa hakikat ergonomika adalah sebagai ilmu dan praktik yang berorientasi pada optimalisasi interaksi manusia dengan sistem melalui pendekatan yang holistik, interdisipliner, dan berbasis pada kebutuhan manusia. Definisi ergonomika tidak bersifat statis, melainkan terus berkembang mengikuti

dinamika teknologi dan perubahan kebutuhan manusia. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam terhadap hakikat dan definisi ergonomika menjadi landasan penting bagi pengembangan teori maupun aplikasi ergonomika dalam berbagai bidang.

1.2 Landasan Filosofis dan Epistemologis Ergonomika

Pemahaman terhadap ergonomika sebagai suatu disiplin ilmu tidak dapat dilepaskan dari landasan filosofis dan epistemologis yang membentuk cara pandang, pendekatan, serta metode yang digunakan dalam mengkaji interaksi manusia dengan sistem kerja. Secara filosofis, ergonomika berakar pada pandangan bahwa manusia merupakan pusat dari setiap aktivitas sistem, sehingga setiap bentuk perancangan harus mempertimbangkan nilai-nilai kemanusiaan, seperti keselamatan, kenyamanan, kesehatan, dan kesejahteraan. Perspektif ini menempatkan ergonomika tidak hanya sebagai ilmu terapan, tetapi juga sebagai disiplin yang memiliki dimensi etis dan normatif dalam pengembangan sistem kerja.

Landasan filosofis ergonomika sangat dipengaruhi oleh perkembangan pemikiran dalam ilmu pengetahuan modern, khususnya yang berkaitan dengan hubungan antara manusia dan teknologi. Pada awal perkembangan industri, pendekatan yang dominan bersifat mekanistik, di mana manusia diperlakukan sebagai bagian dari sistem produksi yang harus menyesuaikan diri dengan mesin. Paradigma ini dikenal sebagai *machine-centered approach*, yang menekankan efisiensi dan produktivitas tanpa mempertimbangkan

keterbatasan manusia secara komprehensif. Namun, seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya aspek kemanusiaan dalam sistem kerja, terjadi pergeseran menuju pendekatan *human-centered*, yang menjadi fondasi utama ergonomika modern (Hilmi *et al.*, 2024).

Dalam konteks ini, ergonomika mengadopsi prinsip bahwa sistem kerja yang optimal adalah sistem yang mampu menyeimbangkan antara kebutuhan manusia dan tuntutan teknologi. Pendekatan ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan kinerja sistem, tetapi juga pada peningkatan kualitas hidup manusia. Dengan demikian, ergonomika memiliki keterkaitan erat dengan konsep *human well-being* dan *quality of working life*, yang menjadi indikator penting dalam menilai keberhasilan suatu sistem kerja (Hasanain, 2024; Le Guillou *et al.*, 2023).

Dari perspektif epistemologis, ergonomika merupakan ilmu yang bersifat interdisipliner dan menggunakan berbagai pendekatan metodologis untuk memperoleh pengetahuan. Ergonomika tidak bergantung pada satu paradigma tunggal, melainkan mengintegrasikan pendekatan kuantitatif dan kualitatif dalam memahami fenomena kerja. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk mengukur variabel-variabel fisik dan fisiologis, seperti beban kerja, postur, dan gaya, sedangkan pendekatan kualitatif digunakan untuk memahami aspek kognitif dan sosial, seperti persepsi, pengalaman pengguna, dan dinamika organisasi (Bora, Hanafie, Andi Haslindah, *et al.*, 2025).

Selain itu, ergonomika juga mengembangkan pendekatan berbasis sistem (*systems approach*), yang memandang interaksi manusia dengan elemen lain sebagai bagian dari suatu sistem yang kompleks dan dinamis. Dalam

pendekatan ini, manusia tidak dipandang secara terpisah, tetapi sebagai bagian integral dari sistem yang mencakup teknologi, lingkungan, dan organisasi. Pendekatan sistem ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap permasalahan kerja, serta menghasilkan solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan (Pratama *et al.*, 2022).

Epistemologi ergonomika juga mencerminkan penggunaan pendekatan berbasis bukti (*evidence-based practice*), di mana setiap rekomendasi desain didasarkan pada data empiris dan hasil penelitian ilmiah. Hal ini menunjukkan bahwa ergonomika tidak hanya bersifat normatif, tetapi juga memiliki dasar ilmiah yang kuat. Penggunaan data antropometri, analisis biomekanika, serta studi kognitif menjadi bagian penting dalam menghasilkan desain yang sesuai dengan karakteristik manusia (Hanafie *et al.*, 2025).

Lebih lanjut, ergonomika juga dipengaruhi oleh paradigma *socio-technical systems*, yang menekankan bahwa sistem kerja terdiri dari dua subsistem utama, yaitu subsistem sosial (manusia, organisasi, budaya) dan subsistem teknis (mesin, teknologi, prosedur). Kedua subsistem ini harus dirancang secara terpadu untuk mencapai kinerja sistem yang optimal. Ketidakseimbangan antara keduanya dapat menyebabkan berbagai permasalahan, seperti kesalahan manusia (*human error*), penurunan produktivitas, dan meningkatnya risiko kecelakaan kerja (Permatasari *et al.*, 2025).

Dalam perkembangan terkini, landasan epistemologis ergonomika juga mulai mengakomodasi pendekatan yang lebih holistik dan adaptif, seperti *participatory ergonomics* dan *macroergonomics*. Pendekatan partisipatif menekankan keterlibatan aktif pengguna atau pekerja dalam proses

perancangan sistem, sehingga solusi yang dihasilkan lebih sesuai dengan kebutuhan nyata di lapangan. Sementara itu, makroergonomi berfokus pada desain sistem organisasi secara keseluruhan, termasuk struktur, kebijakan, dan budaya kerja (Bora, Permatasari, Hernando, *et al.*, 2025).

Di era digital dan industri 4.0, landasan filosofis dan epistemologis ergonomika semakin berkembang dengan masuknya teknologi canggih seperti kecerdasan buatan, Internet of Things (IoT), dan sistem siber-fisik. Dalam konteks ini, ergonomika tidak hanya berperan dalam desain fisik, tetapi juga dalam desain interaksi manusia dengan sistem digital yang kompleks. Hal ini menuntut pendekatan epistemologis yang lebih integratif, yang mampu menggabungkan aspek teknis, kognitif, dan sosial dalam satu kerangka analisis yang utuh.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa landasan filosofis ergonomika berakar pada nilai-nilai kemanusiaan yang menempatkan manusia sebagai pusat dalam sistem kerja, sementara landasan epistemologisnya mencerminkan pendekatan interdisipliner, berbasis sistem, dan berbasis bukti. Kedua landasan ini menjadi dasar dalam pengembangan teori dan praktik ergonomika, serta menentukan arah perkembangan ergonomika di masa depan. Pemahaman yang mendalam terhadap aspek filosofis dan epistemologis ini sangat penting untuk memastikan bahwa penerapan ergonomika tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga memiliki relevansi sosial dan kemanusiaan yang kuat.

1.3 Sejarah dan Evolusi Ergonomika dalam Konteks Global

Perkembangan ergonomika sebagai suatu disiplin ilmu tidak terjadi secara instan, melainkan melalui proses evolusi panjang yang dipengaruhi oleh dinamika sosial, ekonomi, dan teknologi. Secara historis, akar ergonomika dapat ditelusuri sejak masa pra-industri, ketika manusia mulai berupaya menyesuaikan alat dan metode kerja dengan kemampuan tubuhnya secara intuitif. Pada masa ini, meskipun belum dikenal sebagai disiplin ilmiah, prinsip-prinsip dasar ergonomika telah diterapkan secara empiris, misalnya dalam pembuatan alat pertanian, senjata, dan peralatan rumah tangga yang disesuaikan dengan kebutuhan manusia.

Memasuki era Revolusi Industri pada abad ke-18 dan ke-19, terjadi perubahan signifikan dalam sistem kerja, di mana produksi beralih dari skala kecil berbasis kerajinan tangan menjadi produksi massal berbasis mesin. Pada periode ini, pendekatan yang dominan adalah efisiensi mekanistik, yang menempatkan manusia sebagai bagian dari sistem produksi yang harus mengikuti ritme mesin. Tokoh-tokoh seperti Frederick Winslow Taylor melalui konsep *scientific management* berupaya meningkatkan produktivitas dengan mengoptimalkan metode kerja, namun sering kali mengabaikan aspek kenyamanan dan kesejahteraan pekerja. Pendekatan ini kemudian menimbulkan berbagai permasalahan, seperti kelelahan, cedera kerja, dan penurunan kualitas hidup pekerja (Lawi *et al.*, 2023; Yassierli *et al.*, 2020).

Kesadaran akan pentingnya faktor manusia dalam sistem kerja mulai berkembang pada awal abad ke-20, seiring dengan munculnya gerakan *human factors*. Penelitian-

penelitian yang dilakukan dalam konteks militer, khususnya selama Perang Dunia I dan Perang Dunia II, menjadi titik awal berkembangnya ergonomika modern. Dalam situasi perang, efektivitas penggunaan peralatan militer sangat bergantung pada kemampuan manusia dalam mengoperasikan sistem yang kompleks. Hal ini mendorong para ilmuwan untuk mengkaji keterbatasan manusia dalam persepsi, reaksi, dan pengambilan keputusan, sehingga desain peralatan dapat disesuaikan dengan kemampuan operator (Hanafie & Haslindah, 2021).

Setelah Perang Dunia II, ergonomika mulai berkembang sebagai disiplin ilmiah yang lebih terstruktur. Istilah “ergonomics” pertama kali dipopulerkan oleh K. F. H. Murrell pada tahun 1949 di Inggris, yang kemudian diikuti dengan pembentukan organisasi ergonomika di berbagai negara. Pada periode ini, fokus ergonomika tidak hanya pada aspek militer, tetapi juga mulai diterapkan dalam sektor industri, transportasi, dan kesehatan kerja. Penelitian-penelitian ergonomika mulai mencakup aspek fisiologis, biomekanika, dan psikologi kerja, yang menjadi dasar bagi pengembangan metode dan standar ergonomika (Bridger, 2025).

Memasuki dekade 1960-an hingga 1980-an, ergonomika mengalami perluasan ruang lingkup yang signifikan dengan munculnya konsep ergonomi kognitif dan ergonomi organisasi. Perkembangan teknologi komputer dan sistem informasi mendorong kebutuhan untuk memahami interaksi manusia dengan sistem digital, yang melibatkan proses mental seperti persepsi, memori, dan pengambilan keputusan. Pada saat yang sama, perhatian terhadap faktor organisasi, seperti struktur kerja dan komunikasi, semakin

meningkat, sehingga melahirkan pendekatan makroergonomi (Le Guillou *et al.*, 2023).

Perkembangan ergonomika semakin pesat pada akhir abad ke-20 hingga awal abad ke-21, seiring dengan globalisasi dan kemajuan teknologi yang sangat cepat. Ergonomika tidak lagi terbatas pada lingkungan kerja tradisional, tetapi juga mencakup berbagai konteks kehidupan manusia, termasuk desain produk konsumen, sistem transportasi, layanan kesehatan, hingga teknologi informasi. Pendekatan ergonomika menjadi semakin holistik dengan mengintegrasikan aspek fisik, kognitif, dan sosial dalam satu kerangka analisis yang terpadu (Idzani Muttaqin, 2025).

Dalam konteks global, peran organisasi internasional menjadi sangat penting dalam mengembangkan dan menyebarkan konsep ergonomika. Organisasi seperti International Ergonomics Association (IEA) berperan dalam menetapkan definisi, standar, dan arah pengembangan ergonomika secara global. Selain itu, lembaga seperti International Organization for Standardization (ISO) juga mengembangkan standar ergonomika yang menjadi acuan dalam praktik industri di berbagai negara (IEA, 2020; ISO, 2010).

Memasuki era Industri 4.0, ergonomika menghadapi tantangan baru yang berkaitan dengan integrasi teknologi canggih seperti kecerdasan buatan, robotika, Internet of Things (IoT), dan sistem siber-fisik. Interaksi manusia dengan teknologi menjadi semakin kompleks, sehingga menuntut pendekatan ergonomika yang lebih adaptif dan inovatif. Dalam konteks ini, ergonomika tidak hanya berperan dalam memastikan kenyamanan dan keselamatan, tetapi juga dalam meningkatkan pengalaman pengguna (*user experience*) dan

kepercayaan terhadap sistem teknologi (Bora, Hanafie, Andi Haslindah, *et al.*, 2025).

Lebih lanjut, perkembangan menuju era Industri 5.0 menandai pergeseran paradigma yang lebih menekankan kolaborasi antara manusia dan teknologi. Dalam paradigma ini, manusia tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga mitra dalam sistem produksi yang cerdas dan berkelanjutan. Ergonomika memiliki peran strategis dalam memastikan bahwa kolaborasi ini berlangsung secara harmonis, dengan tetap mempertahankan nilai-nilai kemanusiaan sebagai prioritas utama.

Dalam konteks negara berkembang, termasuk Indonesia, perkembangan ergonomika menghadapi tantangan tersendiri yang berkaitan dengan faktor ekonomi, budaya, dan regulasi. Penerapan ergonomika sering kali masih terbatas pada sektor tertentu, dan belum menjadi bagian integral dalam perancangan sistem kerja. Namun demikian, kesadaran akan pentingnya ergonomika terus meningkat, terutama dalam kaitannya dengan keselamatan dan kesehatan kerja serta peningkatan produktivitas nasional.

Dengan demikian, sejarah dan evolusi ergonomika menunjukkan bahwa disiplin ini berkembang secara dinamis mengikuti perubahan kebutuhan manusia dan kemajuan teknologi. Dari pendekatan yang bersifat mekanistik hingga pendekatan yang berorientasi pada manusia dan sistem, ergonomika terus bertransformasi menjadi ilmu yang semakin relevan dalam menghadapi tantangan global. Pemahaman terhadap sejarah ini menjadi penting untuk memberikan konteks dalam pengembangan ergonomika di masa depan, serta untuk memastikan bahwa prinsip-prinsip

dasar ergonomika tetap terjaga dalam setiap inovasi yang dilakukan.

1.4 Ergonomika sebagai Ilmu Interdisipliner

Ergonomika pada hakikatnya merupakan disiplin ilmu yang tidak berdiri sendiri, melainkan berkembang melalui integrasi berbagai bidang ilmu yang berkontribusi dalam memahami dan mengoptimalkan interaksi antara manusia dan sistem kerja. Kompleksitas permasalahan yang dikaji dalam ergonomika, yang melibatkan aspek fisik, kognitif, dan organisasi, menuntut pendekatan yang bersifat interdisipliner. Oleh karena itu, ergonomika tidak dapat dibatasi dalam satu kerangka keilmuan tertentu, tetapi justru memperoleh kekuatannya dari kemampuan menggabungkan berbagai perspektif ilmiah secara sinergis.

Sebagai ilmu interdisipliner, ergonomika mengintegrasikan konsep, teori, dan metode dari berbagai bidang seperti teknik, psikologi, fisiologi, biomekanika, dan ilmu manajemen. Dalam konteks teknik industri, ergonomika berperan dalam merancang sistem kerja yang efisien dan produktif dengan mempertimbangkan keterbatasan dan kemampuan manusia. Pendekatan ini mencakup desain stasiun kerja, tata letak fasilitas, serta optimasi proses kerja yang selaras dengan prinsip-prinsip ergonomika. Integrasi dengan teknik industri ini menjadikan ergonomika sebagai salah satu pilar penting dalam pengembangan sistem produksi yang berkelanjutan (Sanusi *et al.*, 2023; Siregar *et al.*, 2025).

Dari perspektif psikologi, khususnya psikologi kognitif, ergonomika mengkaji bagaimana manusia memproses

informasi, mengambil keputusan, dan berinteraksi dengan sistem yang kompleks. Hal ini menjadi sangat penting dalam konteks modern, di mana banyak pekerjaan melibatkan interaksi dengan teknologi digital dan sistem informasi. Pemahaman tentang persepsi, perhatian, memori, dan beban kerja mental memungkinkan perancangan antarmuka yang lebih intuitif dan mudah digunakan, sehingga dapat mengurangi risiko kesalahan manusia (*human error*) (Tropschuh *et al.*, 2022).

Selain itu, ergonomika juga memiliki keterkaitan erat dengan fisiologi dan biomekanika, yang mempelajari fungsi tubuh manusia serta responsnya terhadap aktivitas fisik. Dalam konteks ini, ergonomika menggunakan data antropometri, analisis gerakan, dan evaluasi beban kerja fisik untuk merancang sistem kerja yang aman dan nyaman. Pendekatan biomekanika, misalnya, digunakan untuk menganalisis gaya dan momen yang bekerja pada tubuh manusia selama melakukan aktivitas tertentu, sehingga dapat mengidentifikasi potensi risiko cedera dan merancang solusi yang tepat (Bora, Hanafie, Haslindah, *et al.*, 2025).

Dalam ranah kesehatan kerja, ergonomika berperan dalam mencegah gangguan muskuloskeletal, kelelahan, serta berbagai penyakit akibat kerja lainnya. Integrasi dengan ilmu kesehatan ini memperkuat peran ergonomika sebagai alat untuk meningkatkan kesejahteraan pekerja sekaligus mengurangi biaya yang terkait dengan kecelakaan dan penyakit kerja. Hal ini menunjukkan bahwa ergonomika tidak hanya berkontribusi pada aspek teknis, tetapi juga pada aspek sosial dan ekonomi dalam suatu organisasi (Yassierli *et al.*, 2020).

Lebih lanjut, ergonomika juga berinteraksi dengan ilmu manajemen dan organisasi, khususnya dalam memahami bagaimana struktur kerja, budaya organisasi, dan sistem komunikasi memengaruhi kinerja manusia. Pendekatan ini dikenal sebagai ergonomi organisasi atau makroergonomi, yang menekankan pentingnya desain sistem kerja secara keseluruhan, bukan hanya pada level individu atau stasiun kerja. Dengan demikian, ergonomika dapat berkontribusi dalam meningkatkan efektivitas organisasi melalui perancangan sistem yang lebih adaptif dan responsif terhadap kebutuhan manusia (Lawi *et al.*, 2023).

Karakter interdisipliner ergonomika juga tercermin dalam penggunaan berbagai metode penelitian yang berasal dari disiplin ilmu yang berbeda. Ergonomika mengadopsi metode eksperimental dari ilmu teknik dan sains, metode survei dan observasi dari ilmu sosial, serta pendekatan kualitatif untuk memahami pengalaman pengguna. Kombinasi metode ini memungkinkan ergonomika untuk menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap fenomena kerja, serta solusi yang lebih tepat sasaran.

Dalam perkembangan terkini, sifat interdisipliner ergonomika semakin diperkuat dengan integrasi teknologi informasi dan ilmu komputer. Munculnya bidang seperti *human-computer interaction* (HCI) dan *user experience* (UX) menunjukkan bagaimana ergonomika berperan dalam merancang interaksi antara manusia dan sistem digital. Selain itu, penggunaan teknologi seperti simulasi komputer, virtual reality, dan wearable devices memungkinkan analisis ergonomika yang lebih akurat dan real-time (Bora, Permatasari, Hernando, *et al.*, 2025; Permatasari *et al.*, 2025).

Namun demikian, sifat interdisipliner ergonomika juga menghadirkan tantangan tersendiri, terutama dalam hal integrasi pengetahuan dan koordinasi antarbidang ilmu. Perbedaan paradigma, metode, dan terminologi antar disiplin dapat menjadi hambatan dalam pengembangan ergonomika yang kohesif. Oleh karena itu, diperlukan kerangka konseptual yang mampu menyatukan berbagai perspektif tersebut dalam suatu pendekatan yang sistematis dan terintegrasi.

Dengan demikian, ergonomika sebagai ilmu interdisipliner memiliki peran strategis dalam menjembatani berbagai bidang ilmu untuk mencapai tujuan bersama, yaitu menciptakan sistem kerja yang optimal bagi manusia dan organisasi. Kemampuan ergonomika dalam mengintegrasikan berbagai perspektif ilmiah menjadikannya sebagai disiplin yang relevan dan adaptif dalam menghadapi tantangan dunia kerja yang semakin kompleks. Pemahaman terhadap sifat interdisipliner ini menjadi penting bagi pengembangan ergonomika ke depan, terutama dalam konteks inovasi teknologi dan perubahan dinamika kerja global.

1.5 Tujuan Strategis dan Paradigma Ergonomika Modern

Ergonomika modern tidak lagi dipahami semata-mata sebagai pendekatan teknis untuk menyesuaikan pekerjaan dengan kemampuan fisik manusia, melainkan telah berkembang menjadi suatu kerangka strategis yang berperan dalam meningkatkan kinerja organisasi sekaligus kesejahteraan manusia secara berkelanjutan. Dalam konteks ini, tujuan ergonomika tidak hanya bersifat operasional, tetapi juga memiliki dimensi strategis yang berkaitan dengan

keberlangsungan sistem kerja dalam jangka panjang. Perkembangan ini mencerminkan adanya pergeseran paradigma dari pendekatan tradisional menuju pendekatan yang lebih holistik dan berorientasi pada manusia.

Secara umum, tujuan utama ergonomika modern dapat diklasifikasikan ke dalam dua dimensi yang saling berkaitan, yaitu peningkatan *human well-being* dan optimalisasi *system performance*. Kesejahteraan manusia mencakup aspek keselamatan, kesehatan, kenyamanan, serta kepuasan kerja. Sementara itu, kinerja sistem berkaitan dengan produktivitas, efisiensi, kualitas, dan keandalan. Kedua tujuan ini tidak dapat dipisahkan, karena peningkatan kesejahteraan manusia secara langsung akan berdampak pada peningkatan kinerja sistem secara keseluruhan (Lawi *et al.*, 2023).

Dalam paradigma ergonomika modern, manusia tidak lagi dipandang sebagai variabel yang harus disesuaikan dengan sistem, melainkan sebagai pusat dari sistem itu sendiri. Pendekatan ini dikenal sebagai *human-centered design*, yang menekankan pentingnya memahami kebutuhan, kemampuan, dan keterbatasan manusia dalam setiap tahap perancangan. Pendekatan ini tidak hanya relevan dalam desain produk fisik, tetapi juga dalam pengembangan sistem digital, layanan, dan organisasi. Dengan demikian, ergonomika berperan dalam menciptakan sistem yang lebih inklusif, adaptif, dan responsif terhadap kebutuhan pengguna (ISO, 2010).

Selain itu, paradigma ergonomika modern juga menekankan pentingnya pendekatan berbasis sistem (*systems thinking*), di mana setiap elemen dalam sistem kerja dipandang sebagai bagian dari keseluruhan yang saling berinteraksi. Dalam pendekatan ini, perubahan pada satu

elemen dapat memengaruhi elemen lainnya, sehingga perancangan sistem harus dilakukan secara menyeluruh dan terintegrasi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi hubungan yang kompleks antara manusia, teknologi, dan lingkungan, serta membantu dalam merancang solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan (Yassierli *et al.*, 2020).

Perkembangan ergonomika juga menunjukkan adanya pergeseran dari pendekatan reaktif menuju pendekatan proaktif. Jika pada awalnya ergonomika lebih banyak digunakan untuk mengatasi masalah yang telah terjadi, seperti cedera kerja atau kelelahan, maka dalam paradigma modern ergonomika digunakan sebagai alat untuk mencegah terjadinya masalah tersebut sejak tahap perancangan. Pendekatan proaktif ini dikenal sebagai *design for ergonomics*, yang menekankan integrasi prinsip ergonomika sejak awal dalam proses desain sistem (Bridger, 2025).

Lebih lanjut, ergonomika modern juga mengadopsi paradigma keberlanjutan (*sustainable ergonomics*), yang mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam perancangan sistem kerja. Dalam konteks ini, ergonomika tidak hanya berfokus pada efisiensi jangka pendek, tetapi juga pada dampak jangka panjang terhadap kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan. Pendekatan ini menjadi semakin penting dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, transformasi digital, dan dinamika pasar tenaga kerja (Bora, Larisang, Hanafie, *et al.*, 2025).

Paradigma lain yang berkembang dalam ergonomika modern adalah *participatory ergonomics*, yang menekankan keterlibatan aktif pekerja atau pengguna dalam proses perancangan sistem. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi

bahwa pengguna memiliki pengetahuan dan pengalaman yang penting untuk menghasilkan solusi yang efektif. Dengan melibatkan pengguna secara langsung, ergonomika dapat menghasilkan desain yang lebih sesuai dengan kebutuhan nyata di lapangan, serta meningkatkan penerimaan dan keberhasilan implementasi (Bora, Herman, *et al.*, 2024)

Dalam konteks organisasi, ergonomika modern juga berperan sebagai bagian dari strategi manajemen untuk meningkatkan daya saing. Integrasi ergonomika dalam strategi perusahaan dapat memberikan keuntungan kompetitif melalui peningkatan produktivitas, pengurangan biaya akibat kecelakaan kerja, serta peningkatan kepuasan dan retensi karyawan. Hal ini menunjukkan bahwa ergonomika tidak hanya memiliki nilai teknis, tetapi juga nilai ekonomis dan strategis bagi organisasi (Hanafie, 2017).

Perkembangan teknologi digital dan kecerdasan buatan juga memberikan dimensi baru dalam paradigma ergonomika modern. Interaksi manusia dengan sistem yang semakin kompleks menuntut pendekatan ergonomika yang mampu mengakomodasi aspek kognitif dan emosional pengguna. Dalam konteks ini, ergonomika berperan dalam merancang sistem yang tidak hanya efisien, tetapi juga memberikan pengalaman pengguna yang positif (*user experience*), serta mendukung pengambilan keputusan yang efektif.

Dengan demikian, tujuan strategis dan paradigma ergonomika modern mencerminkan transformasi ergonomika dari disiplin teknis menjadi pendekatan yang holistik, proaktif, dan berorientasi pada manusia. Ergonomika tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan kenyamanan dan keselamatan kerja, tetapi juga menjadi alat strategis dalam menciptakan sistem yang produktif, berkelanjutan, dan

adaptif terhadap perubahan. Pemahaman terhadap paradigma ini menjadi sangat penting dalam mengembangkan ergonomika yang relevan dengan kebutuhan dunia kerja masa kini dan masa depan.

1.6 Prinsip Fundamental dalam Ergonomika

Prinsip fundamental dalam ergonomika merupakan dasar konseptual yang menjadi acuan dalam merancang sistem kerja yang selaras dengan karakteristik manusia. Prinsip-prinsip ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencerminkan nilai-nilai dasar ergonomika yang menempatkan manusia sebagai pusat dalam setiap proses perancangan. Dengan memahami dan menerapkan prinsip-prinsip ini secara konsisten, ergonomika dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam menciptakan sistem kerja yang aman, nyaman, efisien, dan berkelanjutan.

Salah satu prinsip utama dalam ergonomika adalah *fitting the task to the human*, yaitu menyesuaikan pekerjaan dengan kemampuan dan keterbatasan manusia, bukan sebaliknya. Prinsip ini merupakan inti dari pendekatan *human-centered*, yang menolak pandangan bahwa manusia harus beradaptasi secara paksa terhadap sistem kerja yang tidak sesuai. Dalam implementasinya, prinsip ini mencakup penyesuaian dimensi alat kerja berdasarkan data antropometri, pengaturan beban kerja sesuai kapasitas fisik, serta desain antarmuka yang sesuai dengan kemampuan kognitif pengguna (Hanafie *et al.*, 2022).

Prinsip berikutnya adalah optimasi kinerja sistem (*optimization of system performance*), yang menekankan bahwa tujuan ergonomika tidak hanya meningkatkan

kenyamanan individu, tetapi juga meningkatkan efektivitas dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Dalam konteks ini, ergonomika berperan dalam menemukan keseimbangan antara kebutuhan manusia dan tuntutan sistem. Sistem yang dirancang secara ergonomis tidak hanya mengurangi kesalahan dan kelelahan, tetapi juga meningkatkan produktivitas dan kualitas output (Bora, Ivan Adrian Montolalu, Siregar, *et al.*, 2025).

Selain itu, ergonomika juga mengedepankan prinsip minimisasi kesalahan manusia (*minimization of human error*). Kesalahan manusia merupakan salah satu faktor utama dalam terjadinya kecelakaan kerja dan kegagalan sistem. Oleh karena itu, desain sistem harus mampu mengantisipasi potensi kesalahan melalui pendekatan seperti *error-tolerant design*, penyederhanaan prosedur kerja, serta penyediaan umpan balik yang jelas kepada pengguna. Prinsip ini sangat relevan dalam sistem yang kompleks, seperti industri penerbangan, kesehatan, dan sistem berbasis teknologi tinggi (Bora, Hanafie, Andi Haslindah, *et al.*, 2025).

Prinsip lain yang tidak kalah penting adalah penyesuaian terhadap variasi manusia (*design for variability*). Manusia memiliki perbedaan dalam hal ukuran tubuh, kekuatan, kemampuan kognitif, serta pengalaman. Oleh karena itu, sistem kerja harus dirancang agar dapat mengakomodasi variasi tersebut, misalnya melalui desain yang fleksibel atau dapat disesuaikan (*adjustable design*). Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem dapat digunakan oleh berbagai kelompok pengguna tanpa mengurangi kenyamanan dan keselamatan (Bora, Hanafie, Wahyu Susihono, *et al.*, 2025).

Ergonomika juga menekankan prinsip keseimbangan antara beban kerja dan kapasitas manusia (*workload balance*). Beban kerja yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kelelahan, stres, dan penurunan kinerja, sementara beban kerja yang terlalu rendah dapat menyebabkan kebosanan dan penurunan kewaspadaan. Oleh karena itu, penting untuk merancang sistem kerja yang mampu menjaga keseimbangan antara tuntutan tugas dan kemampuan individu, baik dari aspek fisik maupun mental (Mouhib *et al.*, 2025).

Selanjutnya, prinsip integrasi sistem (*system integration*) menekankan bahwa setiap elemen dalam sistem kerja harus dirancang secara terpadu. Ergonomika tidak hanya berfokus pada satu komponen, seperti alat atau manusia, tetapi juga pada interaksi antara berbagai elemen dalam sistem. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *human-machine-environment system*, di mana keberhasilan sistem ditentukan oleh harmonisasi antara manusia, teknologi, dan lingkungan kerja (Mouhib *et al.*, 2025).

Prinsip pencegahan (*prevention*) juga menjadi landasan penting dalam ergonomika modern. Pendekatan ini menekankan bahwa potensi risiko harus diidentifikasi dan diminimalkan sejak tahap perancangan, bukan hanya ditangani setelah masalah terjadi. Dengan demikian, ergonomika berperan dalam mengurangi risiko cedera kerja, meningkatkan keselamatan, serta mengurangi biaya yang terkait dengan kecelakaan dan gangguan kesehatan kerja (Bridger, 2025).

Selain itu, ergonomika juga mengadopsi prinsip partisipasi (*participatory approach*), yang melibatkan pengguna atau pekerja dalam proses perancangan sistem. Keterlibatan ini memungkinkan perancang untuk

memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai kebutuhan dan kendala yang dihadapi di lapangan. Pendekatan partisipatif ini tidak hanya meningkatkan kualitas desain, tetapi juga meningkatkan tingkat penerimaan dan keberhasilan implementasi (Aminuddin AP *et al.*, 2025).

Dalam konteks modern, prinsip-prinsip ergonomika juga mencakup aspek keberlanjutan (*sustainability*), yang mengintegrasikan pertimbangan ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam perancangan sistem kerja. Ergonomika tidak hanya berfokus pada efisiensi jangka pendek, tetapi juga pada dampak jangka panjang terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa ergonomika memiliki peran strategis dalam mendukung pembangunan berkelanjutan (Adiputra Ghazali *et al.*, 2025).

Dengan demikian, prinsip fundamental dalam ergonomika mencerminkan pendekatan yang holistik dan sistematis dalam merancang interaksi manusia dengan sistem kerja. Prinsip-prinsip ini tidak berdiri sendiri, melainkan saling melengkapi dan membentuk kerangka kerja yang komprehensif dalam penerapan ergonomika. Pemahaman yang mendalam terhadap prinsip-prinsip ini menjadi dasar penting bagi pengembangan solusi ergonomis yang efektif dan berkelanjutan.

1.7 Tantangan dan Arah Masa Depan Ergonomika

Perkembangan ergonomika sebagai disiplin ilmu tidak dapat dilepaskan dari dinamika perubahan teknologi, sosial, dan ekonomi global yang semakin kompleks. Di satu sisi, kemajuan teknologi memberikan peluang besar bagi peningkatan kualitas sistem kerja, namun di sisi lain juga

menghadirkan tantangan baru yang menuntut adaptasi paradigma dan pendekatan ergonomika. Oleh karena itu, memahami tantangan dan arah masa depan ergonomika menjadi sangat penting untuk memastikan relevansi dan kontribusinya dalam menghadapi perubahan dunia kerja yang terus berkembang.

Salah satu tantangan utama ergonomika di masa depan adalah pesatnya perkembangan teknologi digital, khususnya dalam bidang kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), otomatisasi, dan sistem siber-fisik (*cyber-physical systems*). Teknologi ini telah mengubah cara manusia bekerja, dari aktivitas manual menjadi interaksi dengan sistem yang kompleks dan berbasis data. Dalam konteks ini, ergonomika dituntut untuk mampu mengakomodasi interaksi manusia dengan teknologi yang tidak hanya bersifat fisik, tetapi juga kognitif dan emosional. Beban kerja mental, kelelahan kognitif, serta potensi *automation bias* menjadi isu penting yang harus diperhatikan dalam desain sistem modern (Bora, Larisang, Hanafie, *et al.*, 2025; Bora, Lawi, *et al.*, 2024).

Selain itu, perkembangan *human-computer interaction* (HCI) dan *user experience* (UX) semakin menegaskan pentingnya ergonomika dalam merancang sistem digital yang intuitif dan mudah digunakan. Tantangan yang muncul tidak hanya terkait dengan kemudahan penggunaan, tetapi juga dengan bagaimana menciptakan pengalaman pengguna yang positif, meningkatkan kepercayaan terhadap sistem, serta meminimalkan kesalahan dalam pengambilan keputusan. Dalam konteks ini, ergonomika harus mampu mengintegrasikan aspek psikologi, desain, dan teknologi dalam satu kerangka yang komprehensif (Hakim, 2023).

Tantangan lain yang signifikan adalah perubahan pola kerja akibat globalisasi dan digitalisasi, seperti meningkatnya tren *remote working*, *gig economy*, dan fleksibilitas kerja. Perubahan ini membawa implikasi terhadap kondisi kerja, di mana batas antara kehidupan kerja dan kehidupan pribadi menjadi semakin kabur. Ergonomika dituntut untuk memberikan solusi dalam menciptakan lingkungan kerja yang sehat dan produktif, meskipun berada di luar lingkungan kerja tradisional. Isu seperti postur kerja di rumah, manajemen waktu, serta kesehatan mental menjadi bagian penting dalam kajian ergonomika modern.

Dalam konteks demografi, perubahan struktur tenaga kerja global juga menjadi tantangan tersendiri. Peningkatan jumlah pekerja lanjut usia (*aging workforce*) menuntut desain sistem kerja yang lebih inklusif dan adaptif terhadap keterbatasan fisik dan kognitif yang berubah seiring usia. Ergonomika harus mampu merancang sistem yang tidak hanya aman bagi pekerja muda, tetapi juga dapat mendukung produktivitas dan kesejahteraan pekerja yang lebih tua (Bridger, 2025).

Isu keberlanjutan (*sustainability*) juga menjadi tantangan sekaligus arah masa depan ergonomika. Dalam menghadapi perubahan iklim dan tekanan terhadap sumber daya alam, ergonomika perlu berkontribusi dalam merancang sistem kerja yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Konsep *sustainable ergonomics* mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam perancangan sistem, sehingga tidak hanya berfokus pada efisiensi jangka pendek, tetapi juga pada dampak jangka panjang terhadap manusia dan lingkungan (Bora *et al.*, 2026).

Selain itu, perkembangan teknologi wearable dan Internet of Things (IoT) membuka peluang baru dalam pemantauan kondisi pekerja secara real-time. Teknologi ini memungkinkan pengukuran parameter fisiologis, seperti detak jantung, kelelahan, dan postur kerja, sehingga dapat digunakan untuk mencegah risiko kesehatan secara lebih dini. Namun demikian, penggunaan teknologi ini juga menimbulkan tantangan terkait privasi data, etika, dan penerimaan pengguna, yang perlu dikelola secara bijaksana dalam penerapan ergonomika.

Dalam konteks organisasi, tantangan ergonomika juga berkaitan dengan integrasi dalam strategi manajemen. Meskipun manfaat ergonomika telah banyak dibuktikan, implementasinya dalam organisasi masih sering menghadapi hambatan, seperti kurangnya pemahaman, keterbatasan sumber daya, serta resistensi terhadap perubahan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih strategis untuk mengintegrasikan ergonomika dalam kebijakan dan budaya organisasi, sehingga dapat memberikan dampak yang lebih luas dan berkelanjutan (Lawi *et al.*, 2023; Yassierli *et al.*, 2020).

Melihat berbagai tantangan tersebut, arah masa depan ergonomika menunjukkan kecenderungan menuju pendekatan yang lebih holistik, adaptif, dan berbasis teknologi. Ergonomika akan semakin berperan dalam pengembangan sistem yang cerdas (*smart systems*), di mana interaksi antara manusia dan teknologi berlangsung secara dinamis dan kontekstual. Dalam hal ini, konsep *human-centered AI* menjadi salah satu fokus utama, yang menekankan bahwa pengembangan kecerdasan buatan harus tetap mempertimbangkan kebutuhan dan nilai-nilai manusia.

Selain itu, ergonomika masa depan juga akan semakin menekankan pentingnya pendekatan partisipatif dan kolaboratif. Keterlibatan pengguna dalam proses perancangan akan menjadi kunci dalam menghasilkan solusi yang relevan dan efektif. Hal ini sejalan dengan perkembangan paradigma *co-design* dan *user-driven innovation*, yang menempatkan pengguna sebagai mitra aktif dalam inovasi.

Dengan demikian, tantangan dan arah masa depan ergonomika menunjukkan bahwa disiplin ini akan terus berkembang mengikuti perubahan zaman. Ergonomika tidak hanya dituntut untuk mampu beradaptasi dengan teknologi baru, tetapi juga untuk tetap menjaga nilai-nilai dasar yang berorientasi pada manusia. Keseimbangan antara inovasi teknologi dan kesejahteraan manusia akan menjadi kunci utama dalam menentukan peran ergonomika di masa depan. Pemahaman terhadap tantangan ini menjadi penting sebagai dasar dalam mengembangkan strategi dan pendekatan ergonomika yang relevan, responsif, dan berkelanjutan.

BAB 2

ANTROPOMETRI DALAM PERANCANGAN SISTEM KERJA

Oleh Andi Haslindah

Antropometri merupakan salah satu aspek penting dalam ergonomi yang berkaitan dengan pengukuran dimensi tubuh manusia. Dalam perancangan sistem kerja, antropometri digunakan sebagai dasar untuk menciptakan lingkungan kerja, peralatan, mesin, serta fasilitas yang sesuai dengan karakteristik fisik manusia. Penerapan antropometri yang tepat dapat meningkatkan kenyamanan, keselamatan, efisiensi, dan produktivitas kerja. (Ahmad Hanafie A. H., 2025)

Perancangan sistem kerja yang tidak mempertimbangkan dimensi tubuh pekerja sering menimbulkan berbagai masalah, seperti kelelahan, nyeri otot, postur kerja yang tidak alamiah, hingga risiko kecelakaan kerja. Oleh karena itu, data antropometri menjadi elemen penting dalam mendesain stasiun kerja, kursi, meja, alat bantu kerja, maupun tata letak fasilitas produksi. (Ahmad Hanafie A. H., 2022)

Dalam konteks industri modern, penggunaan antropometri tidak hanya terbatas pada desain manual, tetapi juga telah diterapkan dalam sistem otomatisasi, desain produk digital, dan teknologi berbasis human-centered design. Dengan demikian, pemahaman mengenai

antropometri menjadi kompetensi dasar dalam perancangan sistem kerja yang ergonomis. (Ahmad Hanafie A. H., 2019)

2.1 Pengertian Antropometri

Secara etimologis, antropometri berasal dari bahasa Yunani, yaitu *anthropos* yang berarti manusia dan *metron* yang berarti ukuran. Antropometri dapat diartikan sebagai ilmu yang mempelajari pengukuran dimensi tubuh manusia. Ilmu ini mencakup pengukuran ukuran, berat, volume, dan karakteristik khusus tubuh manusia, termasuk tulang, otot, dan jaringan lemak. (Ahmad Hanafie, 2021)

Antropometri dalam ergonomi digunakan untuk memperoleh data ukuran tubuh manusia yang kemudian diaplikasikan dalam desain fasilitas kerja. Data tersebut meliputi tinggi badan, panjang lengan, lebar bahu, tinggi siku, jangkauan tangan, dan berbagai dimensi tubuh lainnya. (Noviardi, 2023)

Pengukuran antropometri meliputi berbagai dimensi, di antaranya:

- **Ukuran Linear:** Tinggi badan, panjang badan (bayi), dan panjang bagian tubuh (lengan, kaki).
- **Berat:** Berat badan total.
- **Lingkar:** Lingkar kepala, lingkar lengan atas (LiLA), lingkar perut, dan lingkar pinggang.
- **Komposisi:** Ketebalan lemak kulit, massa otot, dan jaringan adiposa.

Tujuan utama antropometri adalah menyesuaikan desain kerja dengan kemampuan dan keterbatasan manusia sehingga tercipta sistem kerja yang aman, nyaman, dan efisien.

2.2 Tujuan dan Manfaat Antropometri

Antropometri adalah ilmu untuk mengukur dimensi tubuh manusia, seperti tinggi badan, berat badan, lingkar kepala, dan bentuk tubuh. Bahkan, antropometri juga bisa mengukur ketebalan jaringan tubuh, termasuk jaringan lemak, tulang, dan otot. Pengukuran-pengukuran tersebut dilakukan dengan berbagai cara dan tujuan. Tujuannya adalah menilai status gizi, memantau pertumbuhan, dan merancang desain ergonomis. Manfaat utamanya meliputi deteksi dini masalah kesehatan/stunting, evaluasi intervensi gizi, dan penyesuaian fasilitas kerja agar aman serta efisien. (Adrian, 2024)

Berikut adalah penjelasan rinci mengenai tujuan dan manfaat antropometri:

Tujuan penggunaan antropometri dalam sistem kerja antara lain:

- Menyesuaikan fasilitas kerja dengan ukuran tubuh pekerja.
- Mengurangi risiko cedera akibat postur kerja yang tidak ergonomis.
- Meningkatkan kenyamanan dan efisiensi kerja.
- Mendukung keselamatan dan kesehatan kerja (K3).
- Mengoptimalkan interaksi manusia dengan mesin dan lingkungan kerja.
- Perancangan Ergonomis: Dalam dunia industri, data antropometri bertujuan merancang produk, kursi, meja, atau stasiun kerja yang sesuai dengan ukuran tubuh manusia untuk kenyamanan dan produktivitas.

Penerapan antropometri memberikan berbagai manfaat, yaitu:

- Mengurangi kelelahan kerja.
- Meminimalkan keluhan musculoskeletal disorders (MSDs).
- Meningkatkan produktivitas pekerja.
- Meningkatkan kualitas kerja.
- Mengurangi kesalahan kerja (human error).
- Mendukung desain produk yang ramah pengguna (*user friendly*).
- Keamanan dan Efisiensi Kerja (Ergonomi): Mengurangi risiko cedera otot atau tulang (*musculoskeletal disorders*) akibat posisi kerja yang tidak sesuai.

2.3 Jenis-Jenis Antropometri

Antropometri adalah ilmu pengukuran dimensi tubuh manusia untuk berbagai tujuan, seperti perancangan produk (ergonomi). Secara garis besar, antropometri dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu **antropometri statis** (posisi diam/struktural) dan **antropometri dinamis** (posisi bergerak/fungsional). (AIA, 2026)

Antropometri statis (struktural) adalah pengukuran dimensi fisik manusia dalam posisi diam, tetap, atau standar (seperti berdiri atau duduk tegak) untuk menentukan ukuran tubuh dasar. Pengukuran ini mencakup berat badan, tinggi tubuh, lebar tubuh, lingkaran kepala, dan panjang lengan yang digunakan untuk perancangan produk atau fasilitas ergonomis. (Hanse H. Pattiasina, 2021)

Berikut adalah poin-poin penting mengenai antropometri statis:

- Posisi Pengukuran: Tubuh berada dalam keadaan diam (posisi standar/diam).

- Fokus Pengukuran: Dimensi fisik yang diukur antara lain tinggi badan, berat badan, lingkar tubuh, serta panjang lengan/kaki.
- Fungsi: Data digunakan dalam bidang ergonomi untuk merancang produk agar nyaman dan sesuai dengan dimensi tubuh pengguna, contohnya meja, kursi, pakaian, dan ruang kerja.
- Faktor Pengaruh: Data antropometri statis dipengaruhi oleh umur, jenis kelamin, suku bangsa, pekerjaan, dan faktor kehamilan.

Antropometri dinamis adalah pengukuran tubuh manusia saat melakukan gerakan atau aktivitas tertentu. Pengukuran ini mempertimbangkan jangkauan gerak tubuh selama bekerja. Atau Antropometri dinamis adalah pengukuran dimensi tubuh manusia saat bergerak atau melakukan aktivitas kerja, seperti jangkauan tangan, sudut putar, dan gerakan fungsional lainnya. Ini bertujuan merancang fasilitas kerja/produk yang aman, nyaman, dan efisien, seperti kursi mobil, meja kerja, atau ruang operator. (Ahmad Hanafie H. A., 2015)

Contoh antropometri dinamis:

- Jangkauan tangan ke depan
- Jangkauan vertikal
- Ruang gerak kaki
- Area kerja optimal tangan
- Jangkauan tangan/kaki saat beroperasi.
- Sudut fleksi/ekstensi.
- Ruang gerak di area terbatas.

Contoh Aplikasi: Desain dashboard mobil, stasiun kerja operator, alat pemanen, dan antarmuka mesin.

Perbedaan: Berbeda dengan *antropometri statis* yang mengukur posisi tubuh diam (tinggi/lebar tubuh).

Data antropometri dinamis digunakan dalam desain kontrol mesin, panel operator, dan tata letak fasilitas kerja. (Ir. Muh. Arif Latar, 2026)

2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Antropometri

Antropometri, yaitu pengukuran dimensi fisik tubuh manusia, dipengaruhi oleh kombinasi faktor genetik dan lingkungan. Faktor utama yang mempengaruhi meliputi umur, jenis kelamin, etnis/suku bangsa, kondisi sosial ekonomi, nutrisi, aktivitas fisik/pekerjaan, serta kondisi fisiologis khusus seperti kehamilan. (Ahmad Hanafie, 2021).

Berikut adalah penjabaran faktor-faktor tersebut:

- **Umur:** Dimensi tubuh berubah signifikan dari masa anak-anak hingga dewasa, dan cenderung menurun saat lanjut usia.
- **Jenis Kelamin:** Laki-laki dan perempuan memiliki perbedaan struktur dan dimensi tubuh yang nyata (misalnya, lebar bahu dan panggul).
- **Suku/Etnis:** Perbedaan ras atau suku bangsa mempengaruhi variasi ukuran tubuh manusia secara keseluruhan.
- **Nutrisi dan Kesehatan:** Asupan makanan mempengaruhi pertumbuhan berat dan tinggi badan, sementara infeksi penyakit dapat menghambat pertumbuhan.
- **Aktivitas/Pekerjaan:** Gaya hidup aktif atau jenis pekerjaan tertentu memengaruhi komposisi tubuh, massa otot, dan lemak.

- **Kondisi Sosial Ekonomi:** Mempengaruhi akses terhadap gizi dan fasilitas kesehatan yang berdampak pada pertumbuhan fisik.
- **Faktor Kehamilan:** Mempengaruhi perubahan bentuk dan ukuran tubuh secara khusus pada perempuan.
- **Faktor Genetik:** Merupakan dasar utama yang menentukan potensi pertumbuhan fisik seseorang.

Pengukuran antropometri (seperti [Berat Badan](#), Tinggi Badan, lingkar tubuh, dan Lipatan Kulit) sangat penting untuk menilai [status gizi](#) dan [pertumbuhan anak](#). (Andrian, 2026)

2.5 Prinsip-prinsip Penggunaan Data Antropometri

Prinsip penggunaan data antropometri dalam ergonomi dan perancangan produk bertujuan menyesuaikan dimensi alat/lingkungan dengan tubuh manusia (fit) untuk kenyamanan, keamanan, dan efisiensi. Tiga prinsip utamanya adalah perancangan untuk individu ekstrem, penyesuaian (adjustability), dan rata-rata, dengan fokus pada distribusi persentil tubuh. (AIA, 2026)

Prinsip-Prinsip Utama Penerapan Data Antropometri:

- **Perancangan bagi Individu dengan Ukuran Ekstrem (Design for Extreme Individuals):**
 - **Ukuran Maksimum (Persentil 95th ke atas):** Digunakan untuk menentukan dimensi yang menampung orang terbesar, contohnya lebar pintu, tinggi pintu, atau ruang kepala.

- **Ukuran Minimum (Persentil 5th ke bawah):**
Digunakan untuk menentukan dimensi yang terjangkau oleh orang terkecil, contohnya jangkauan tombol kontrol atau jarak pedal.
- **Perancangan dengan Ukuran yang Dapat Disesuaikan (Adjustable Design):**
 - Prinsip ini memberikan fleksibilitas pada produk agar bisa digunakan oleh berbagai populasi (baik yang bertubuh kecil maupun besar). Contoh: kursi mobil yang dapat maju-mundur/naik-turun, atau meja kerja yang ketinggiannya bisa diatur. (Hanafie, 2024)
- **Perancangan bagi Rata-Rata Populasi (Design for Average User):**
 - Prinsip ini menggunakan nilai rata-rata (persentil 50th) untuk elemen yang tidak krusial dalam kenyamanan jangka panjang. Biasanya digunakan untuk desain yang digunakan dalam waktu singkat atau terbatas, contohnya tinggi loket bank atau meja kasir. (Hanafie, ERGONOMI INDUSTRI: MENCIPTAKAN LINGKUNGAN KETJA YANG EFESIEN DAN AMAN, 2025).

2.6 Persentil Dalam Ergonomi

Persentil antropometri adalah nilai batas yang menunjukkan persentase tertentu dari populasi (misal: 5%, 50%, 95%) yang memiliki ukuran tubuh sama atau lebih kecil dari nilai tersebut. Ini digunakan dalam ergonomi untuk merancang produk/stasiun kerja agar sesuai dengan variasi ukuran manusia. (Abadi, 2026).

Persentil dalam antropometri merupakan suatu ukuran statistik yang sangat penting untuk menggambarkan variasi ukuran tubuh manusia dalam suatu populasi. Persentil adalah

suatu nilai persentase tertentu dari orang yang memiliki ukuran pada atau di bawah nilai tersebut dalam bukunya (Wignjosoebroto, 2008). Persentil membagi data ukuran tubuh menjadi beberapa kelompok berdasarkan persentase. Misalnya, persentil ke-50 menunjukkan nilai tengah dari distribusi data, artinya 50% populasi memiliki ukuran tubuh di bawah nilai tersebut.

Penggunaan persentil, para desainer produk, arsitek, dan ergonomis dapat menciptakan produk dan lingkungan yang sesuai dengan berbagai ukuran tubuh manusia, sehingga meningkatkan kenyamanan dan keamanan pengguna. Informasi mengenai persentil sangat berguna dalam perancangan furnitur, kendaraan, peralatan kerja, dan ruang publik. (Hanafie, *ERGONOMI DAN PRODUKTIVITAS*, 2026)

Perbedaan Persentil 5, 50, dan 95

Persentil antropometri memiliki hitungan dari persentil 1 hingga 99. Penetapan antropometri dapat diterapkan dalam distribusi normal yang diformulasikan berdasarkan nilai rata-rata dan standar deviasi dari data yang ada kemudian digabungkan dengan dengan nilai persentil yang telah ada.

Persentil 5, 50, dan 95 merupakan salah satu persentil dalam antropometri yang mendefinisikan sejumlah populasi. Perbedaan ketiganya terletak pada jumlah populasi berdasarkan persentil tersebut. Berikut penjelasan ketiga persentil (5, 50, dan 95).

- Persentil 5: Hanya 5% populasi yang memiliki ukuran tubuh **lebih kecil** dari nilai persentil 5.
- Persentil 50: 50% populasi memiliki ukuran tubuh di bawah nilai ini dan 50% lainnya di atasnya.

- Persentil 95: Hanya 5% populasi yang memiliki ukuran tubuh **lebih besar** dari nilai persentil 95.

Ketiga persentil diatas merupakan pembagian data antropometri untuk acuan perancangan produk. Melalui data persentil tersebut, rancangan produk yang ergonomis dan tidak menimbulkan rasa tidak nyaman bagi tubuh di kemudian hari.

2.7 Pengukuran Antropometri

Pengukuran antropometri adalah metode non-invasif untuk mengukur dimensi fisik tubuh manusia (berat, tinggi, lingkar, tebal lemak) guna menilai status gizi, tumbuh kembang anak, dan risiko penyakit. Prosedur ini krusial di fasilitas kesehatan untuk memantau kesehatan populasi, khususnya balita, melalui indeks seperti BB/U, TB/U, dan IMT/U.

Alat Ukur Antropometri

Beberapa alat yang digunakan dalam pengukuran antropometri antara lain:

Anthropometer : perangkat standar untuk mengukur dimensi fisik tubuh manusia (berat, panjang/tinggi, lingkar tubuh) guna memantau pertumbuhan dan mendeteksi stunting. Alat utama meliputi timbangan (bayi/dewasa), *stadiometer* (tinggi badan), *infantometer* (panjang badan), dan pita lingkar (kepala/lengan).

Berikut adalah jenis-jenis alat antropometri yang umum digunakan (sering disebut *Antropometri Kit*): (Halodoc, 2026).

- **Alat Ukur Berat Badan:**
 - **Timbangan Bayi (*Baby Scale*):** Timbangan digital/manual untuk bayi dengan mangkok timbang.
 - **Timbangan Injak (*Standing Weight*):** Timbangan digital untuk balita yang sudah bisa berdiri maupun dewasa.
- **Alat Ukur Panjang dan Tinggi Badan:**
 - **Infantometer (*Length Board*):** Alat untuk mengukur panjang badan bayi atau balita (0-2 tahun) dalam posisi berbaring.
 - **Stadiometer:** Alat untuk mengukur tinggi badan anak atau dewasa dalam posisi berdiri.
- **Alat Ukur Lingkar Tubuh:**
 - **Pita Lingkar (*LILA/Measuring Tape*):** Digunakan untuk mengukur lingkar lengan atas (pita LILA) dan lingkar kepala (metline) guna memantau status gizi.
 - **Pita Pengukur (*Waist Ruler*):** Digunakan untuk mengukur lingkar perut atau lingkar pinggang.
- **Alat Tambahan:**
 - **Caliper:** Alat ukur lipatan kulit (*skinfold*) untuk memperkirakan persentase lemak tubuh.

Kursi antropometri: Kursi antropometri adalah alat laboratorium ergonomi yang dirancang khusus untuk mengukur dimensi tubuh manusia secara presisi, terutama pada posisi duduk. Alat ini digunakan dalam studi ergonomi untuk merancang fasilitas kerja yang nyaman dan sesuai dengan ukuran tubuh manusia. (Harjanto, 2019)

Berikut adalah poin kunci mengenai kursi antropometri:

- **Fungsi Utama:** Mengukur berbagai dimensi tubuh manusia, dengan kemampuan mengukur hingga 34 dimensi tubuh.

- Pengukuran: Khusus dirancang untuk mengukur data antropometri posisi duduk.
- Material: Umumnya terbuat dari besi atau bahan logam, menjadikannya lebih tahan lama dibandingkan kursi kayu.
- Penggunaan: Sering digunakan dalam praktikum ergonomi di universitas, industri, maupun dalam perekrutan militer.
- Keunggulan: Menyediakan satu alat yang efisien untuk mengukur banyak dimensi tubuh manusia sekaligus.

Prosedur Pengukuran

Langkah-langkah pengukuran antropometri:

1. Menentukan dimensi tubuh yang akan diukur.
Langkah-langkah pengukuran antropometri dimulai dengan menentukan dimensi tubuh yang akan diukur (berat, tinggi, lingkar) sesuai tujuan evaluasi. Proses ini meliputi persiapan alat terkalibrasi, pengukuran yang presisi (contoh: berdiri tegak tanpa alas kaki), hingga pencatatan hasil yang akurat untuk menentukan produk yang akan dirancang. (dr.Krisandryka, 2025)
2. Menyiapkan alat ukur.
Menyiapkan alat ukur antropometri yang standar (sesuai Keputusan Menteri Kesehatan) adalah langkah krusial untuk memastikan validitas. Pastikan semua alat (timbangan, stadiometer, infantometer, pita LiLA) berada dalam kondisi baik, terkalibrasi, dan siap digunakan sebelum pengukuran dimulai. (Keluarga, 2023)
3. Memastikan posisi tubuh sesuai standar.
Memastikan posisi tubuh sesuai standar merupakan langkah krusial untuk mendapatkan data yang akurat dan konsisten dalam antropometri. Berikut adalah

panduan posisi tubuh standar untuk berbagai pengukuran:

Pengukuran Tinggi Badan (Berdiri)

- Posisi: Berdiri tegak di atas alas datar (stadiometer).
- Titik Kontak: Tumit, betis, bokong, punggung atas, dan belakang kepala harus menempel pada dinding atau alat ukur.
- Kepala: Pandangan lurus ke depan, posisi kepala sejajar dengan bidang *Frankfort* (garis imajiner dari saluran telinga ke batas bawah soket mata harus horizontal).
- Kaki: Kedua kaki rapat dan tumit menempel pada lantai/alat.
- Napas: Subjek diminta menarik napas dalam dan menahan napas (tegak maksimal) saat pengukuran.

Pengukuran Berat Badan

- Posisi: Berdiri tegak di tengah timbangan.
- Tubuh: Pandangan ke depan, bahu relaks, tangan menggantung di samping tubuh, dan tidak bergerak (diam).
- Pakaian: Pakaian seminimal mungkin atau ringan untuk menghindari bias hasil.

Pengukuran Panjang Badan (Bayi < 2 tahun)

- Posisi: Terlentang di atas alat pengukur panjang badan (infantometer).
- Kepala: Bagian atas kepala (vertex) menempel pada papan kepala tetap.
- Tubuh: Tubuh lurus, bahu menempel rata, lutut ditekan lembut agar lurus.
- Kaki: Telapak kaki tegak lurus menempel pada papan geser.

Pengukuran Lingkar Tubuh (Lengan/Pinggang)

- Lingkar Lengan Atas (LiLA): Berdiri tegak, lengan kiri/kanan (sesuai standar lokal) ditekuk 90°. diukur di titik tengah antara bahu dan siku.

- **Lingkar Pinggang:** Berdiri tegak, perut tidak ditarik, napas biasa, diukur di titik tersempit antara tulang rusuk dan panggul.

Pengukuran Posisi Duduk

- **Posisi:** Duduk tegak di bangku standar, tumit, lutut, pinggul, dan siku berada pada sudut 90°.
4. Melakukan pengukuran secara teliti.
Melakukan pengukuran antropometri secara teliti adalah kunci untuk mendapatkan data yang akurat. Ketelitian ini melibatkan prosedur standar yang ketat untuk menghindari bias atau kesalahan.
 5. Mencatat hasil pengukuran.
Mencatat hasil pengukuran antropometri adalah tahap krusial untuk memastikan data akurat, valid, dan dapat digunakan untuk evaluasi. Langkah ini harus dilakukan segera setelah pengukuran selesai untuk menghindari kesalahan pencatatan atau lupa.

2.8 Integrasi Antropometri dan Ergonomi

Integrasi antropometri dan ergonomi adalah pendekatan perancangan sistem kerja, produk, atau lingkungan yang berbasis pada pengukuran dimensi tubuh manusia (antropometri) untuk menciptakan kondisi kerja yang aman, nyaman, dan efisien (ergonomi). Data antropometri digunakan untuk menyesuaikan alat dan ruang kerja dengan karakteristik fisik pengguna, sehingga mengurangi risiko *Musculoskeletal Disorders* (MSDs) atau cedera otot. (Fachri Raziq El Ahmady, 2020).

Hal-hal penting dalam Integrasi Antropometri dan Ergonomi:

- Tujuan Utama: Menghindari ketidaksesuaian fisik antara peralatan dan manusia (ketidaksesuaian dimensi produk dan tubuh pengguna).
- Pengukuran Dimensi Tubuh: Meliputi data fisik seperti tinggi tubuh, lebar tubuh, berat tubuh, dan massa otot, yang bisa diukur secara manual atau menggunakan Kursi Antropometri.
- Penerapan Persentil: Dalam perancangan ergonomi, sering menggunakan persentil data:
 - Persentil 5 (Tubuh Kecil): Untuk menetapkan batas jangkauan maksimal.
 - Persentil 50 (Rata-rata): Untuk dimensi rata-rata.
 - Persentil 95 (Tubuh Besar): Untuk menetapkan batas ruang minimal (contoh: tinggi pintu/lebar kursi).
- Implementasi:
 - Perancangan Produk & Fasilitas: Kursi, meja kerja, alat manufaktur, dan pakaian kerja.
 - Perancangan Hunian: Bimbingan teknis ergonomi sering diterapkan pada hunian sederhana agar lebih fungsional.
 - Analisis Postur: Menggunakan metode seperti RULA (Rapid Upper Limb Assessment) untuk mengevaluasi postur kerja berdasarkan data antropometri.
- Manfaat: Meningkatkan kenyamanan, produktivitas, serta meminimalkan risiko kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja.

Integrasi ini umumnya mengikuti prinsip-prinsip ergonomi seperti bekerja dalam posisi normal, mengurangi beban kerja, dan menyesuaikan ketinggian kerja dengan dimensi tubuh pengguna.

DAFTAR PUSTAKA

- abadi, M. S. (2026). *Perbedaan Persentil 5, 50, Dan 95 Dalam Pokok Bahasan Antropometri*. -: [https:// Soloabadi. Com/Perbedaan-Persentil-5-50-Dan-95-Dalam- Pokok-Bahasan-Antropometri/](https://Soloabadi.Com/Perbedaan-Persentil-5-50-Dan-95-Dalam-Pokok-Bahasan-Antropometri/).
- Adrian, D. K. (2024). *Berikut Adalah Penjelasan Rinci Mengenai Tujuan Dan Manfaat Antropometri*.. -: [https://Www.Alodokter.Com/Antropometri-Illmu- Untuk-Mengukur-Tubuh-Manusia](https://Www.Alodokter.Com/Antropometri-Illmu-Untuk-Mengukur-Tubuh-Manusia).
- Ahmad Hanafie, A. H. (2019). Ergonomic Seating Design On Machine Combine Harvester. *Advances In Engineering Research, 1st International Conference On Materials Engineering And Management - Engineering*, 1-5.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2021). *Ergonomi*. Banten: Cv. Aa. Rizky.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2022). Ergonomic Evaluation Of Anthropometry Based Hydroponic Plants Watering Automation System. *Journal Of Engineering, Technology & Applied Science (Jetas)*, 421-426.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2025). Study Of Flexibility Factors In Determining The Design Of Ergonomic Urban Pedestrian Sidewalk Facilities, . *International Journal Of Computational Methods And Ekspriment Meanstruments*, 35-43.
- Ahmad Hanafie, H. A. (2015). A Study Of Ergonomic City Transport By Anthropometric Approach. *The 1st International Conference On Civil Engineering And Infrastructure (Iccej)*, 97-101.
- Aia. (2026). *Jenis Antropometri*. -: https://Antropometriindonesia.Org/Index.Php/Detail/S ub/2/7/5/Jenis_Antropometri.

- Andrian, D. K. (2026). *Antropometri, Ilmu Untuk Mengukur Tubuh Manusia*. <https://www.alodokter.com/antropometri-ilmu-untuk-mengukur-tubuh-manusia>.
- Dr.Krisandryka. (2025). *Teknik Pemeriksaan Antropometri*. -: <https://www.alomedika.com/tindakan-medis/pediatric-dan-neonatology/pemeriksaan-antropometri/teknik>.
- Fachri Raziq El Ahmady, D. (2020). Penerapan Metode Ergonomic Function Deployment Dalam Perancangan Alat Bantu Untuk Menurunkan Balok Kayu. *Jisi: Jurnal Integrasi Sistem Industri*, 21-30.
- Halodoc, R. (2026). *Antropometri Kit*. -: <https://www.halodoc.com/artikel/antropometri-kit-alat-deteksi-stunting-akurat>.
- Hanafie, A. (2024). Keselamatan Dan Kesehatan Kerja. In A. H. Ahmad Hanafie, 4. *Bab 6. Ergonomi Di Tempat Kerja: Desain Dan Perbaikan Lingkungan Kerja Yang Mendukung Kesehatan*, Pp. 89-1 Cv. Lauk Puyu Press. Kab. Agam, Sumatera Barat. (Pp. 89-101). Kab. Agam, Sumatera Barat.: Cv. Lauk Puyu Press.
- Hanafie, A. (2025). Ergonomi Industri: Menciptakan Lingkungan Kerja Yang Efisien Dan Aman. In A. H. Andi Haslindah, 8. *Bab 6. Desain Tempat Kerja: Menciptakan Lingkungan Yang Aman Dan Nyaman* Cv. Lauk Puyu Press. Kab. Agam, Sumatera B (Pp. 125-137). Kab. Agam, Sumatera Barat: Cv. Lauk Puyu Press. .
- Hanafie, A. (2025). Ergonomi Industri: Menciptakan Lingkungan Ketja Yang Efisien Dan Aman. In D. Andi Halindah, *Desain Tempat Kerja : Menciptakan Lingkungan Yang Aman Dan Nyaman* (Pp. 125-137). Kab. Agam: Cv. Lauk Puyu.

- Hanafie, A. (2026). Ergonomi Dan Produktivitas. In P. 2.-3.-6.-0.-7.-8. 16. Bab 2. Tujuan Dan Manfaat Ergonomi Bagi Produktivitas, *Ahmad Hanafie, Dkk* (Pp. 21-34). Padang: Penerbit Minang Media Press .
- Hanse H. Pattiasina, D. (2021). Kajian Antropometri Pengrajin Tenun Ikat Khas Maluku. *Simetrik*, 495-503.
- Harjanto, F. T. (2019). Identifikasi Kebutuhan Konsumen Terhadap Kursi Antropometri Dengan Metode Kansei Engineering. *Jurnal Teknik Industri Universitas Tanjungpura*, 27-31.
- Ir. Muh. Arif Latar, M. (2026). *Antropometri Dan Aplikasi Dalam Perancangan Fasilitas Kerja*. -: https://digilib.esaunggul.ac.id/public/ueu-paper-6680-04_antropometri_1_1.pdf.
- Keluarga, D. P. (2023). *Pengenalan Alat Antropometri Persiapan Pemeliharaan*. <https://www.youtube.com/watch?v=Lka3r1azim0&t=17s>.
- Noviardi, R. S. (2023). Perancangan Alat Ukur Antrophometri Berbasis Internet Of Things. *Simtika*, 1-9.

BAB 3

BIOMEKANIKA KERJA DAN MANUAL MATERIAL HANDLING

Oleh Ahmad Hanafie

Dalam dunia industri, aktivitas kerja yang melibatkan manusia sebagai penggerak utama masih sangat dominan, terutama pada proses pengangkatan, pemindahan, mendorong, menarik, maupun membawa material secara manual. Aktivitas tersebut dikenal sebagai *Manual Material Handling* (MMH). Apabila dilakukan tanpa memperhatikan prinsip ergonomi dan biomekanika kerja, maka MMH dapat menyebabkan kelelahan, cedera otot rangka (*musculoskeletal disorders/MSDs*), penurunan produktivitas, hingga kecelakaan kerja. (Andi Haslindah A. H., 2018)

Biomekanika kerja hadir sebagai pendekatan ilmiah untuk memahami bagaimana tubuh manusia bergerak dan menerima beban saat bekerja. Dengan memahami prinsip biomekanika, perusahaan dapat merancang sistem kerja yang aman, nyaman, efisien, dan produktif. (Ahmad Hanafie A. H., 2021)

Penanganan material secara manual atau *Manual Material Handling* (MMH) merupakan aktivitas dominan di berbagai sektor industri yang, jika tidak didukung oleh pendekatan biomekanika kerja yang benar, berpotensi tinggi

menimbulkan cedera muskuloskeletal dan penurunan produktivitas kerja. (Krishna Tri Sanjaya, 2018)

Biomekanika kerja memainkan peran krusial dalam mengevaluasi interaksi fisik antara manusia dan beban, di mana prinsip-prinsip mekanika teknik diterapkan untuk menganalisis risiko pada aktivitas *Manual Material Handling*—seperti mengangkat, mendorong, dan membawa—guna menciptakan metode kerja yang aman dan efisien. (Susanti, 2026).

Sistem kerja yang kurang optimal dalam perancangan berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain menurunnya tingkat produktivitas, meningkatnya kellehan pekerja, terjadinya kesalahan dalam pelaksanaan kerja, serta meningkatnya risiko kecelakaan dan gangguan kesehatan kerja. (Andi Haslindah, 2026)

3.1 Pengertian Biomekanika Kerja

Biomekanika kerja adalah studi tentang interaksi antara pekerja dengan peralatan, material, dan lingkungan kerja dengan menerapkan prinsip fisika dan teknik pada sistem tubuh manusia. Tujuannya adalah untuk meningkatkan performa kerja dan meminimalkan risiko cedera otot rangka (*musculoskeletal disorders* atau MSDs) akibat aktivitas fisik. (Latar, 2026)

Lingkungan Kerja adalah proses penilaian faktor fisik dan produktivitas pekerja, dengan tujuan mengidentifikasi risiko dan menerapkan pengendalian agar kondisi kerja optimal. (Haslindah, EVALUASI DAN PENILAIAN ERGONOMI, 2026)

Biomekanika kerja menganalisis:**• Gerakan tubuh manusia**

Biomekanika kerja menganalisis gerakan tubuh manusia dengan menerapkan prinsip mekanika, anatomi, dan fisiologi untuk memahami interaksi antara pekerja dan aktivitasnya. Studi ini bertujuan mengoptimalkan efisiensi gerak, mencegah cedera, dan mengurangi kelelahan otot, sendi, serta tendon saat beraktivitas. (Udin, 2026)

- Analisis Postur dan Gerak: Mempelajari bagaimana tubuh bergerak, posisi tulang, dan kontraksi otot (kinematika dan kinetika).
- Karakteristik Mekanik: Menganalisis beban mekanik pada tubuh, seperti gaya angkat, tekanan pada sendi, dan beban pada tulang.
- Kinerja dan Efisiensi: Merancang sistem kerja yang memaksimalkan hasil dengan meminimalkan risiko cedera dan kelelahan (ergo-biomekanika).
- Aplikasi Praktis: Menentukan berat maksimal beban angkat, desain stasiun kerja, dan perbaikan metode kerja.

• Biomekanika kerja menganalisis: Gaya dan beban yang bekerja pada tubuh

Biomekanika kerja menganalisis gaya dan beban yang bekerja pada tubuh dengan menerapkan prinsip mekanika teknik untuk mengevaluasi dampak aktivitas fisik (mengangkat, mendorong, membawa) terhadap sistem otot dan sendi. Tujuannya adalah merancang metode kerja ergonomis untuk memaksimalkan hasil dan mencegah cedera. (Arum, 2025)

- Gaya dan Beban Tubuh: Mengukur dampak beban fisik, seperti berat benda, terhadap otot dan sendi untuk menilai risiko kelelahan atau cedera (*overuse*).
- Momen dan Tuas Lengan: Menganalisis jarak gaya terhadap sumbu sendi untuk menentukan beban yang dihasilkan.
- Analisis Dinamis & Statis: Mengukur gaya saat tubuh bergerak atau diam (posisi kerja) untuk mengevaluasi momen pada sendi.
- Gaya Gravitasi & Reaksi: Menghitung gaya berat segmen tubuh sendiri (gravitasi) dan gaya reaksi akibat beban eksternal.

- **Biomekanika kerja menganalisis: Posisi kerja**

Biomekanika kerja menganalisis posisi kerja dengan mempelajari interaksi mekanis antara tubuh manusia (otot, sendi, tulang) dan aktivitas fisik untuk meningkatkan efisiensi serta mencegah cedera, seperti Musculoskeletal Disorders (MSDs). Analisis ini mengevaluasi beban mekanik, momen gaya, dan risiko postur janggal, seperti membungkuk atau menjangkau, guna merancang posisi ergonomis yang aman. (Dr. H. Agus Alamsyah P., 2026)

- Evaluasi Gaya & Beban: Mengukur gaya eksternal (beban) dan beban internal (moment gaya) pada segmen tubuh (tulang belakang, lengan, kaki) saat bekerja.
- Analisis Postur (Postural Analysis): Mengidentifikasi posisi tubuh yang berisiko, seperti membungkuk, memutar, atau jangkauan tangan yang terlalu jauh.

- Kekuatan Kerja Otot: Menilai kemampuan otot berdasarkan posisi anggota tubuh, arah gerakan, dan kecepatan.
 - Metode Analisis: Menggunakan alat bantu seperti *Ovako Work Posture Analysis System (OWAS)*, *Rapid Upper Limb Assessment (RULA)*, atau *Rapid Entire Body Assessment (REBA)*.
 - Tujuan: Menerapkan prinsip ergonomi untuk memaksimalkan hasil kerja sekaligus meminimalisir risiko cedera otot/tulang akibat posisi tubuh yang tidak tepat.
- **Biomekanika kerja menganalisis: Keseimbangan tubuh.**
 Biomekanika kerja menganalisis keseimbangan tubuh dengan mempelajari hubungan antara otot, sendi, dan tulang saat melakukan aktivitas kerja untuk menjaga stabilitas dan mencegah cedera. Analisis ini berfokus pada pengaturan posisi pusat massa tubuh di atas bidang tumpuan (kaki) baik secara statis (diam) maupun dinamis (bergerak). (Fajar, 2025)
 - Pusat Gravitasi & Stabilitas: Keseimbangan tercapai ketika garis gravitasi tubuh tetap berada dalam bidang tumpuan dengan sedikit goyangan.
 - Analisis Postur: Mengevaluasi posisi tubuh, terutama segmen punggung dan kaki, menggunakan bidang sagital untuk memastikan keamanan gerakan.
 - Aplikasi pada Pekerjaan: Melibatkan analisis penanganan material manual (MMH) untuk mengatur beban maksimal yang boleh diangkat agar beban tidak mengganggu titik berat tubuh pekerja.

- Tujuan: Mengoptimalkan teknik kerja, meminimalkan risiko jatuh, dan mencegah cedera otot/tulang akibat gerakan tidak alamiah.

- **Biomekanika kerja menganalisis: Penggunaan energi saat bekerja.**

Biomekanika kerja menganalisis penggunaan energi saat bekerja dengan mengukur konsumsi kalori dan beban fisik untuk memastikan aktivitas tidak melebihi kapasitas tubuh, seringkali menggunakan metode fisiologi untuk menentukan waktu istirahat yang tepat. Analisis ini mengevaluasi beban kerja (ringan hingga berat) untuk mencegah kelelahan dini dan cedera muskuloskeletal. (Gemini, 2026)

- Pengukuran Energi: Konsumsi energi diukur untuk mengetahui beban kerja (sedang, moderat, berat) agar tidak menyebabkan kelelahan.
- Metode Fisiologi Kerja: Meliputi pengukuran langsung (konsumsi oksigen) atau tidak langsung (denyut jantung/nadi) untuk menghitung kalori yang dikeluarkan.
- Tujuan utama: Menentukan waktu istirahat yang diperlukan agar pekerja dapat bekerja tanpa kelelahan berlebih.
- Aplikasi Manual Material Handling (MMH): Menilai beban angkat dan gaya tekan pada tulang belakang (L5/S1) agar tidak melebihi batas aman 6500 N.

3.2 Konsep dasar Biomekanika

Biomekanika adalah cabang ilmu yang menerapkan prinsip-prinsip mekanika (fisika) untuk menganalisis struktur dan fungsi sistem biologi, terutama gerakan tubuh manusia. Ini menggabungkan mekanika terapan dengan biologi/fisiologi untuk memahami gaya, gerak, dan interaksinya. Konsep ini krusial dalam meningkatkan performa fisik, mencegah cedera, dan pengembangan alat kesehatan. (Dr. Nuril Ahmad., 2024)

a. Gaya (*Force*)

Gaya merupakan dorongan atau tarikan yang menyebabkan benda bergerak. Dalam aktivitas kerja, gaya muncul ketika pekerja mengangkat, menarik, mendorong, atau membawa beban.

Rumus dasar gaya:

$$\mathbf{F = ma}$$

Keterangan:

F = gaya

m= massa

a = percepatan

b. Momen Gaya (*Moment*)

Momen gaya adalah kecenderungan suatu gaya untuk memutar benda terhadap titik tumpu.

$$\mathbf{M=F \times d}$$

Keterangan:

M = momen gaya

F = gaya

d = jarak dari titik tumpu

Semakin jauh jarak beban dari tubuh, semakin besar momen gaya yang diterima tulang belakang.

c. Titik Berat (*Center of Gravity*)

Titik berat adalah titik pusat distribusi berat tubuh. Dalam aktivitas MMH, menjaga titik berat tetap stabil sangat penting untuk mempertahankan keseimbangan tubuh dan mencegah jatuh.

d. Keseimbangan Tubuh

Keseimbangan terjadi ketika garis gravitasi tubuh berada dalam bidang tumpuan kaki. Posisi kerja yang stabil dapat mengurangi kelelahan dan risiko cedera.

Menyeimbangkan beban kerja di setiap stasiun *retouching* sehingga tidak ada pekerja yang memiliki beban terlalu tinggi (*overload*) atau terlalu rendah (*idle*). (Andi Haslindah A. H., 2021)

3.3 Pengertian Manual Material Handling (MMH)

Manual Material Handling (MMH) adalah aktivitas pemindahan beban atau material (mengangkat, menurunkan, mendorong, menarik, membawa, memegang) yang dilakukan secara manual menggunakan tenaga otot manusia. Aktivitas ini umum di industri (logistik, manufaktur, konstruksi) dan berisiko tinggi menyebabkan cedera muskuloskeletal (MSD) jika tekniknya salah. (Siska, 2018).

Karakteristik & Risiko Utama MMH:

- Aktivitas Utama: Meliputi kegiatan mengangkat (*lifting*), menurunkan (*lowering*), mendorong (*pushing*), menarik (*pulling*), dan membawa (*carrying*), Memindahkan (*moving*).
- Risiko Kesehatan: Penyebab umum kelelahan, cedera punggung bawah (*low back pain*), nyeri bahu, dan pergelangan tangan.
- Faktor Risiko: Ditentukan oleh berat beban, frekuensi, durasi, dan postur kerja yang tidak ergonomis.
- Faktor Ergonomi: MMH yang benar memerlukan pendekatan ergonomi untuk mengurangi beban biomekanik pada tubuh pekerja.

Manual Material Handling (MMH)—aktivitas memindahkan barang menggunakan tenaga otot manusia—banyak ditemukan pada sektor-sektor yang melibatkan pemindahan, pengangkatan, dan penyimpanan barang secara rutin. Berdasarkan data industri, MMH sangat dominan di lingkungan berikut: (Kusnadi, 2020)

- Industri Manufaktur: Di pabrik, aktivitas manual sangat umum ditemukan dalam proses produksi, perakitan, dan pengemasan.
- Pergudangan (Warehousing) & Logistik: Pekerja sering mengangkat, menyusun, dan memindahkan barang ke dalam penyimpanan atau ke atas truk.
- Konstruksi: Pekerja konstruksi banyak melakukan aktivitas fisik seperti mengangkat material berat (semen, batu bata).
- Rumah Sakit: Tenaga medis sering melakukan aktivitas mengangkat atau memindahkan pasien dan peralatan berat secara manual.

- Pertanian: Sektor ini melibatkan kegiatan manual dalam panen, pengangkutan hasil panen, dan penanganan beban berat.
- Pelabuhan & Transportasi: Aktivitas bongkar muat kargo atau peti kemas yang masih membutuhkan tenaga manusia untuk penanganan akhir.

MMH dipilih karena fleksibilitasnya yang tinggi dan biaya yang lebih murah, terutama di ruang terbatas, meskipun memiliki risiko cedera tulang belakang (musculoskeletal disorders) yang tinggi jika tidak dilakukan secara ergonomis.

Meskipun sering dianggap efisien dan murah, MMH yang tidak terkelola dengan baik dapat menurunkan produktivitas akibat cedera kerja

3.4 Prinsip Ergonomi dalam MMH

Prinsip ergonomi dalam *Manual Material Handling* (MMH) bertujuan untuk menyesuaikan tugas fisik—seperti mengangkat, mendorong, dan membawa beban—dengan kemampuan tubuh manusia guna mencegah cedera muskuloskeletal. Fokus utamanya adalah menjaga beban tetap dekat dengan tubuh, menghindari gerakan membungkuk/memutar, dan meminimalkan beban berat. (Hanafie, ERGONOMI DAN PRODUKTIVITAS, 2026).

Berikut adalah penjabaran prinsip ergonomi dalam aktivitas MMH:

- **Penyelarasan Beban dan Tubuh:** Menjaga beban sedekat mungkin dengan tubuh (pusat gravitasi) untuk mengurangi tekanan pada tulang belakang.
Menjaga beban sedekat mungkin dengan tubuh (pusat gravitasi) adalah prinsip dasar ergonomi yang krusial

untuk melindungi tulang belakang dari cedera dan kelelahan otot. Dengan mendekatkan beban ke pusar atau perut, tekanan pada tulang belakang berkurang secara signifikan karena beban disangga oleh otot inti yang kuat, bukan hanya oleh otot punggung bawah. (Suhartanto, 2026)

- **Mengapa Beban Harus Dekat dengan Tubuh?**

- Mengurangi Tekanan (Stres) Tulang Belakang: Semakin jauh beban dari tubuh, semakin besar gaya ungkit (leverage) yang dihasilkan, yang melipatgandakan beban sebenarnya pada tulang belakang.
- Mengoptimalkan Pusat Gravitasi: Pusat gravitasi manusia terletak di sekitar vertebra sakral kedua, di tengah panggul. Membawa barang mendekati titik ini menjaga tubuh tetap seimbang.
- Mencegah Cedera Punggung: Mengangkat dengan beban jauh dari tubuh meningkatkan risiko sakit punggung, cedera bantalan tulang belakang, hingga *hernia*.

- **Teknik Pengangkatan yang Benar (Penyelarasan Tubuh):**

1. Posisi Kaki: Buka kaki selebar bahu untuk dasar penopang yang stabil.
2. Jongkok, Bukan Membungkuk: Tekuk lutut dan pinggul saat mengambil beban, jaga punggung tetap lurus.
3. Dekatkan Beban: Posisikan beban sedekat mungkin dengan perut/pusar sebelum dan selama mengangkat.
4. Angkat dengan Kaki: Gunakan otot kaki yang kuat untuk berdiri, bukan otot punggung.

5. Jangan Memutar: Hindari memutar tubuh saat membawa beban. Pindahkan posisi kaki untuk berputar.

- **Postur Kerja Aman:**

- Mengangkat/Menurunkan: Menggunakan kekuatan otot kaki, bukan punggung, dengan lutut ditekuk dan punggung tetap lurus.
- Hindari Putaran (Twisting): Tidak memutar tubuh saat mengangkat atau membawa beban; gerakkan kaki untuk berputar.

- **Mengurangi Gaya dan Beban:** Meminimalkan berat beban, mengurangi frekuensi pengangkatan, dan memperpendek jarak angkut.

Prinsip yang Anda sebutkan—mengurangi gaya dan beban—adalah salah satu pilar utama dalam ergonomi untuk mencegah cedera otot rangka (*Musculoskeletal Disorders/MSDs*), khususnya cedera punggung akibat aktivitas manual material handling (pengangkatan, penurunan, pendorongan, penarikan). (PASS, 2023)

- Meminimalkan Berat Beban (Reduce Load Weight). Mengurangi berat objek yang diangkat adalah cara paling efektif untuk menurunkan gaya kompresi pada tulang belakang.
- Mengurangi Frekuensi Pengangkatan (Reduce Frequency), Mengurangi seberapa sering pekerja melakukan pengangkatan dapat mencegah kelelahan otot (fatigue) yang menjadi penyebab utama cedera.
- Memperpendek Jarak Angkut (Shorten Transport Distance), Mengurangi jarak perpindahan manual meminimalkan akumulasi kelelahan dan risiko terpeleset/tersandung

- **Zona Kerja Nyaman:** Menempatkan material di antara lutut dan bahu (*zona power zone*) untuk menghindari jangkauan terlalu rendah atau terlalu tinggi. (Ahmad Hanafie A. H., 2025)

Prinsip yang Anda sebutkan adalah bagian dari Ergonomi Industri untuk mengurangi risiko cedera otot rangka (*Musculoskeletal Disorders / MSDs*). (GMI, 2025)

Area terbaik untuk menangani beban adalah di depan tubuh, antara lutut dan bahu, atau sedekat mungkin dengan inti tubuh (pusat gravitasi)

- Mengurangi Beban Punggung: Mengangkat di bawah lutut atau di atas bahu meningkatkan tekanan pada tulang belakang.
 - Memaksimalkan Kekuatan: Otot lengan dan bahu bekerja paling efisien dalam jangkauan ini.
 - Mencegah Cedera: Menghindari jangkauan berlebih, membungkuk, atau memutar tubuh
- **Mekanisasi dan Alat Bantu:** Menggunakan alat bantu seperti troli, konveyor, atau alat pengangkat mekanis untuk mendorong, menarik, atau memindahkan beban berat. Mekanisasi dan Alat Bantu adalah penerapan prinsip ergonomi dengan menggunakan peralatan mekanis untuk menggantikan atau membantu tenaga manusia dalam mendorong, menarik, mengangkat, atau memindahkan beban berat. (Cermati, 2025).
 - Mengurangi Beban Fisik: Meminimalisir risiko cedera otot rangka (*Musculoskeletal Disorders/MSDs*) pada pekerja, seperti cedera punggung bawah.
 - Meningkatkan Efisiensi: Mempercepat proses pemindahan barang dan meningkatkan produktivitas.

- Meningkatkan Keselamatan: Mengurangi potensi kecelakaan kerja akibat kelelahan atau beban yang berlebihan (overload).
- **Penataan Lingkungan:** Memastikan ruang gerak cukup dan lantai tidak licin.

Penataan lingkungan untuk memastikan ruang gerak cukup dan lantai tidak licin adalah langkah krusial untuk mencegah risiko jatuh. Berikut adalah panduan praktis penataan lingkungan:

1. Memastikan Ruang Gerak Cukup (Aksesibilitas)

- Jalur Bebas Hambatan: Pastikan jalur berjalan (koridor/lorong) lebar dan bebas dari barang-barang seperti tumpukan buku, koran, mainan, atau furnitur yang menghalangi jalan.
- Penataan Furnitur: Atur furnitur agar tidak menonjol ke jalur lalu lintas manusia. Pastikan ada ruang yang cukup untuk berputar, terutama jika menggunakan alat bantu jalan seperti walker atau kursi roda.
- Hindari Kabel Melintang: Atur kabel listrik agar menempel di dinding atau diikat rapi. Hindari kabel yang melintang di tengah ruangan karena berisiko membuat tersandung.
- Pencahayaan Terang: Pastikan seluruh ruangan, terutama lorong dan tangga, memiliki pencahayaan yang cukup. Ganti bohlam yang redup dengan yang lebih terang untuk mempermudah melihat hambatan.

2. Memastikan Lantai Tidak Licin

- Hindari Kesen/Karpet Licin: Singkirkan keset yang mudah bergeser. Gunakan keset yang memiliki lapisan anti-selip (non-slip) di bagian bawahnya.

- Segera Bersihkan Tumpahan: Bersihkan tumpahan air, minyak, atau cairan lainnya segera setelah terjadi.
- Perhatikan Lantai Kamar Mandi: Gunakan keset karet di dalam kamar mandi atau pasang stiker anti-selip pada lantai kamar mandi.
- Penggunaan Bahan Lantai: Hindari penggunaan wax atau pembersih lantai yang meninggalkan lapisan licin.
- Alas Kaki Aman: Gunakan alas kaki di dalam rumah yang memiliki sol karet (tidak licin) dan hindari berjalan hanya dengan kaus kaki.

3. Pertimbangan Tambahan

- Pasang *Handrail* (Pegangan): Pasang pegangan di dinding kamar mandi atau sepanjang tangga untuk memberikan tumpuan tambahan.
- Kerapian Barang: Simpan barang-barang yang sering digunakan di tempat yang mudah dijangkau, sehingga tidak perlu memanjat atau merogoh terlalu dalam.

Penerapan prinsip-prinsip ini membantu mengurangi kelelahan dan risiko cedera serius pada pekerja. Tahapan pendekatan sistem umumnya meliputi analisis masalah, perancangan sistem, dan implementasi. (Florida B, 2025)

3.5 Hubungan Biomekanika, Ergonomi, dan Produktivitas

Biomekanika, ergonomi, dan produktivitas saling berkaitan erat: biomekanika menganalisis gerakan fisik manusia untuk merancang sistem kerja yang ergonomis, yang pada gilirannya mengurangi cedera dan meningkatkan efisiensi serta produktivitas pekerja secara keseluruhan.

Pendekatan ini memastikan pekerjaan sesuai dengan kemampuan tubuh, meminimalisir kelelahan, dan memaksimalkan output kerja. (Ikbal Anggara, 2025).

Salah satu faktor penting yang memengaruhi performa dan kesejahteraan tenaga kerja adalah **ergonomi**, yakni ilmu yang mempelajari penyesuaian sistem kerja, peralatan, dan lingkungan terhadap kemampuan serta keterbatasan manusia. (Haslindah, 2025)

Hubungan Antar Komponen:

- **Biomekanika ke Ergonomi (Landasan Ilmiah):** Biomekanika menyediakan data ilmiah mengenai kekuatan, ketahanan, dan batasan otot/sendai manusia. Data ini digunakan dalam ergonomi untuk merancang peralatan, stasiun kerja, dan metode kerja yang aman, nyaman, dan sesuai dengan anatomi tubuh.
- **Ergonomi ke Produktivitas (Peningkatan Kinerja):** Penerapan prinsip ergonomi (seperti desain kursi, pencahayaan, atau alat bantu angkat) mengurangi keluhan muskuloskeletal (cedera otot/tulang) dan kelelahan. Saat pekerja nyaman dan sehat, fokus dan kecepatan kerja meningkat, yang berdampak langsung pada peningkatan produktivitas.
- **Dampak Langsung (Keamanan & Efisiensi):** Dengan mengaplikasikan biomekanika dalam ergonomi, risiko kecelakaan kerja menurun, memungkinkan alur kerja yang lebih efisien dan berkelanjutan. (Syafitri, 2026)

DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, M. S. (2026). *Perbedaan Persentil 5, 50, dan 95 dalam Pokok Bahasan Antropometri*. -: <https://soloabadi.com/perbedaan-persentil-5-50-dan-95-dalam-pokok-bahasan-antropometri/>.
- Adrian, d. K. (2024). *Berikut adalah penjelasan rinci mengenai tujuan dan manfaat antropometri*. -: <https://www.alodokter.com/antropometri-ilmu-untuk-mengukur-tubuh-manusia>.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2019). Ergonomic Seating Design On Machine Combine Harvester. *Advances in Engineering Research, 1st International Conference on Materials Engineering and Management - Engineering*, 1-5.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2021). *Ergonomi*. Banten: CV. AA. Rizky.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2022). Ergonomic Evaluation of Anthropometry Based Hydroponic Plants Watering Automation System. *Journal of Engineering, Technology & Applied Science (JETAS)*, 421-426.
- Ahmad Hanafie, A. H. (2025). Study of Flexibility Factors in Determining the Design of Ergonomic Urban Pedestrian Sidewalk Facilities, . *International Journal of Computational Methods and Eksprimment Meanstruments*, 35-43.
- Ahmad Hanafie, H. A. (2015). A Study Of Ergonomic City Transport by Anthropometric Approach. *The 1st International Conference on Civil Engineering and Infrastructure (ICCEI)*, 97-101.

- AIA. (2026). *Jenis Antropometri*. -: https://antropometriindonesia.org/index.php/detail/sub/2/7/5/jenis_antropometri.
- Andi Haslindah, A. H. (2018). Implementation of Ergonomics Biomechanis on Harvest Management by Combined Harvester Machine. *International Journal of Advances In Scientific Research and Engineering (IJASRE)* , 178-185.
- Andi Haslindah, A. H. (2021). Keseimbangan Tenaga Kerja pada Stasiun Kerja Bagian Proses Retouching saat Pandemi Covid-19 Dengan Pendekatan Waktu Standar. *Patria Artha Technological Journal (PATJou)* , 168-171.
- Andi Haslindah, d. (2026). *Teknik Perancangan Sistem Kerja*. Padang: Get Press Indonesia.
- Andrian, d. K. (2026). *Antropometri, Ilmu untuk Mengukur Tubuh Manusia*. [https://www.alodokter.com/ antropometri-ilmu-untuk-mengukur-tubuh-manusia](https://www.alodokter.com/antropometri-ilmu-untuk-mengukur-tubuh-manusia).
- Arum, I. (2025). *Apa Itu Biomekanika Kerja? Anak Teknik Industri Wajib Tahu!* -: <https://soloabadi.com/apa-itu-biomekanika-kerja-anak-teknik-industri-wajib-tahu/>.
- Aziz, Y. A. (2023). *Pengertian Budaya Organisasi: Fungsi, Jenis, Karakteristik, dan Contoh*. Yogyakarta: <https://deepublishstore.com/blog/materi/budaya-organisasi/>.
- Cermati. (2025). *Alat Berat Industri Logistik: Meningkatkan Efisiensi dan Produktivitas*. -: <https://protect.cermati.com/alat-berat-industri-logistik/>.
- Codemi. (2024). *Panduan Mengembangkan Budaya Organisasi dan Definisinya*. <https://id.linkedin.com/pulse/panduan-mengembangkan-budaya-organisasi-dan-definisinya-wvvrof>.

- Dr. H. Agus Alamsyah P., S. M. (2026). *Biomekanika, Melakukan Analisis Postur Kerja*. -: [https:// www.youtube.com/watch?v=BCRSjYKVTvg](https://www.youtube.com/watch?v=BCRSjYKVTvg).
- Dr. Nuril Ahmad., M. (2024). *Gerakan Tubuh Manusia Biomekanika dalam Olah Raga*. Balikpapan: Borneo Novelty Publishin.
- dr.Krisandryka. (2025). *Teknik Pemeriksaan Antropometri*. -: <https://www.alomedika.com/tindakan-medis/pediatrik-dan-neonatologi/pemeriksaan-antropometri/teknik>.
- Fajar, J. (2025). *Menjaga Keseimbangan Tubuh: Langkah Awal Mencegah Jatuh dan Cedera*. -: <https://dinkes.kapuaskab.go.id/web/menjaga-keseimbangan-tubuh-langkah-awal-mencegah-jatuh-dan-cedera/>.
- Florida B, L. J. (2025). *Konsep Dasar: Teknik dan Manajemen Industri*. Kab. Agam: Tahapan pendekatan sistem umumnya meliputi analisis masalah, perancangan sistem, dan implementasi. .
- Gemini. (2026). *Faal Kerja dan Energi dalam Biomekanika*. -: <https://www.scribd.com/document/466534985/6-Fisiologi-Faal-Kerja-pdf>.
- GMI. (2025). *Mengangkat Barang Dengan Benar : Berikut Teknik Yang Harus Diketahui*. -: [https:// garudamart.com/mengangkat-barang-dengan-benar-berikut-teknik-yang-harus-diketahui/](https://garudamart.com/mengangkat-barang-dengan-benar-berikut-teknik-yang-harus-diketahui/).
- Hanafie, A. (2024). Keselamatan Dan Kesehatan Kerja. In A. H. Ahmad Hanafie, *4. Bab 6. Ergonomi di Tempat Kerja: Desain dan Perbaikan Lingkungan Kerja Yang Mendukung Kesehatan*, pp. 89-1 CV. Lauk Puyu Press. Kab. Agam, Sumatera Barat. (pp. 89-101). Kab. Agam, Sumatera Barat: CV. Lauk Puyu Press.

- Hanafie, A. (2025). Ergonomi Industri: Menciptakan Lingkungan Kerja Yang Efisien Dan Aman. In d. Andi Halindah, *Desain Tempat Kerja : Menciptakan Lingkungan yang Aman dan Nyaman* (pp. 125-137). Kab. Agam: CV. Lauk Puyu.
- Hanafie, A. (2026). Ergonomi Dan Produktivitas. In p. 2.-3.-6.-0.-7.-8. 16. Bab 2. Tujuan dan Manfaat Ergonomi Bagi Produktivitas, *Ahmad Hanafie, dkk* (pp. 21-34). Padang: Penerbit Minang Media Press .
- Haslindah, A. (2025). Ergonomi Dalam Lingkungan Kerja Fisik (Manufactur dan Industri). In d. M. Ansyar Bora, *Prinsip Ergonomi Dalam Dunia Kerja: Menyeimbangkan Kesehatan dan Efisiensi* (pp. 141-153). Kab. Agam: Yayasan Tri Edukasi Ilmiah.
- Haslindah, A. (2026). Evaluasi Dan Penilaian Ergonomi. In D. S. Richard Ap, *Ergonomi: Prinsip, Praktik, dan Aplikasi* (pp. 45-63). Kota Padang: Get Press Indonesia.
- Ikbal Anggara, d. (2025). *Ergonomi Industri: Menciptakan Lingkungan Kerja Yang Efisien Dan Aman*. Kota Padang: Cv. Literaksi Press.
- Krishna Tri Sanjaya, d. (2018). Analisis Postur Kerja Manual Material Handling Menggunakan Biomekanika dan NIOSH. *JATI UNIK*, 70-80.
- Kusnadi, K. (2020). Evaluasi Aktivitas Manual Material Handling dan Penerapan K3 Bagian Palletizing Kemasan Jerigen di PT. XYZ. *Performa: Media Ilmiah Teknik Industr*, 55 - 68.
- Latar, M. A. (2026). *Biomekanika*. -: https://digilib.esaunggul.ac.id/public/UEU-paper-6685-09_Biomechanik.pdf.
- PASS, L. K. (2023). *10 Cara mengangkat beban dan membawa barang dengan benar*. -: <https://lspkatigapass.co.id/artikel/detail/10-cara-mengangkat-beban-dan-membawa-barang-dengan-benar>.

- Siska, M. (2018). Analisis Postur Kerja Manual Material Handling Pada Aktivitas Pemindahan Pallet Dengan Menggunakan Metode Biomekanika Rula (Studi Kasus : Pt. Alam Permata Riau). *Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*.
- Suhartanto, S. F. (2026). *Salah Posisi Mengangkat Beban, Hati-hati Sakit Pinggang!* Yogyakarta: <https://www.old.rsiydpdhi.com/salah-posisi-mengangkat-beban-hati-hati-sakit-pinggang/>.
- Susanti, L. (2026). *Biomekanika Kerja dan Penanganan Manual*. -: <https://www.scribd.com/document/421364355/Biomekanika-Dan-MMH>.
- Syafitri, N. (2026). *Biomekanika dan Ergonomi Kerja*. <https://www.scribd.com/document/509693899/MAKALAH-KELOMPOK-4-BIOMEKANIKA>.
- Udin. (2026). *Biomekanika: Analisis Gerakan Tubuh Manusia*. -: <https://www.scribd.com/document/660624226/Biomekanika-Perencanaan-sistem-kerja-dan>.

BAB 4

FISIOLOGI KERJA DAN ANALISIS BEBAN KERJA FISIK

Oleh Monita Rahayu

Dalam era industri *modern*, optimalisasi produktivitas kerja tidak lagi hanya bergantung pada kecanggihan teknologi dan kapasitas mesin, melainkan juga pada kapasitas fisiologis manusia yang mengoperasikannya. Fisiologi kerja menempatkan tubuh pekerja sebagai pusat dari sistem kerja, di mana setiap aktivitas fisik akan memicu respons fungsional dari berbagai sistem organ, khususnya sistem kardiovaskular, respiratori, dan muskuloskeletal (Bridger, 2009). Keharmonisan antara tuntutan tugas fisik (*work demand*) dengan kapasitas kerja nyata seseorang (*work capacity*) merupakan kunci utama untuk mencapai efisiensi kerja yang optimal tanpa mengorbankan aspek kesehatan dan keselamatan tenaga kerja (Tarwaka, 2015).

Ketidakseimbangan antara beban kerja fisik dengan kemampuan adaptasi tubuh sering kali menjadi pemicu utama munculnya fenomena penurunan performa di tempat kerja. Ketika beban kerja melebihi batas toleransi fisiologis secara terus-menerus, tubuh akan mengalami akumulasi asam laktat dan pengosongan cadangan energi yang berujung pada kelelahan ekstrem (*fatigue*) serta penurunan konsentrasi (Iridiastadi and Yassierli, 2014). Kelalaian dalam mengukur

dan mengevaluasi beban fisik ini tidak hanya merugikan organisasi akibat penurunan produktivitas, tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap peningkatan angka kecelakaan kerja serta risiko cedera otot rangka atau *Musculoskeletal Disorders*.

Oleh karena itu, analisis beban kerja fisik berbasis fisiologi kerja hadir sebagai metode evaluasi yang sangat krusial dalam dunia ergonomi industri. Pengukuran indikator objektif seperti laju denyut jantung (*heart rate*), konsumsi oksigen (VO_2), dan pengeluaran energi (*energy expenditure*) memberikan data yang akurat mengenai seberapa besar tekanan (*stress*) yang diterima oleh tubuh pekerja saat beraktivitas. Melalui metode-metode ilmiah seperti perhitungan persentase Cardiovascular Load (%CVL), manajemen perusahaan dapat memetakan klasifikasi beban kerja secara kuantitatif untuk menentukan tingkat risiko serta urgensi intervensi yang diperlukan (Suma'mur, 2020).

Secara keseluruhan, pemahaman yang mendalam mengenai fisiologi kerja dan analisis beban fisik ini berfungsi sebagai landasan ilmiah dalam merancang sistem kerja yang humanis. Melalui pendekatan preventif, pihak manajemen dapat merekayasa ulang lingkungan kerja, baik melalui penyesuaian administratif seperti pengaturan waktu istirahat yang ideal (*rest periods*) dan rotasi kerja, maupun perbaikan teknis pada stasiun kerja (Manuaba, 2000). Pada akhirnya, integrasi analisis ini diharapkan mampu menciptakan lingkungan kerja yang memenuhi prinsip dasar ergonomi, yaitu menyalurkan antara beban kerja dengan kemampuan tubuh demi mewujudkan iklim kerja yang sehat, aman, nyaman, dan produktif.

4.1 Pengantar Fisiologi Kerja dan Ergonomis

Fisiologi kerja merupakan cabang ilmu ergonomi yang mempelajari respons, batasan, dan adaptasi fungsional sistem organ tubuh manusia—terutama sistem kardiovaskular, respiratori, dan muskuloskeletal—saat melakukan aktivitas fisik di tempat kerja (Astrand and Rodahl, 2004). Dalam ekosistem industri, ilmu ini berfungsi sebagai jembatan untuk menyelaraskan antara kapasitas kerja fisiologis karyawan dengan beban kerja serta paparan lingkungan kerja yang dihadapi (Bridger, Kilminster and Slaven, 2008). Melalui pendekatan fisiologis yang tepat, manajemen dapat merancang sistem kerja yang tidak hanya mengoptimalkan produktivitas, tetapi juga secara preventif melindungi pekerja dari kelelahan ekstrem (*fatigue*) dan risiko cedera otot rangka kronis.

4.1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Fisiologi Kerja

Fisiologi kerja (*work physiology*) secara harfiah merupakan integrasi antara ilmu fisiologi manusia dengan rekayasa sistem kerja di bawah payung besar ergonomi. Menurut para ahli, fisiologi kerja didefinisikan sebagai cabang ilmu yang mempelajari manifestasi, respons, dan adaptasi fungsional dari sistem organ tubuh manusia ketika dihadapkan pada berbagai tingkat intensitas aktivitas fisik selama bekerja (Astrand and Rodahl, 2004). Ilmu ini berfokus pada bagaimana tubuh manusia bertindak sebagai sebuah mesin biologis yang mengonversi energi kimia dari makanan menjadi energi mekanik untuk menghasilkan gerakan atau kerja.

Berbeda dengan fisiologi olahraga yang berfokus pada pencapaian performa maksimal atau prestasi atlet, fisiologi kerja menitikberatkan perhatiannya pada optimalisasi produktivitas kerja jangka panjang yang berjalan selaras dengan pemeliharaan kesehatan, keselamatan, dan kenyamanan pekerja. Pendekatan utama dalam fisiologi kerja adalah memastikan bahwa tuntutan fisik dari suatu pekerjaan tidak melampaui batas kemampuan biologis normal manusia, sehingga kondisi homeostasis (keseimbangan internal tubuh) dapat tetap terjaga.

Ruang lingkup kajian fisiologi kerja sangat luas dan mencakup berbagai aspek vital dari aktivitas biologis manusia di lingkungan industri. Secara garis besar, ruang lingkup tersebut meliputi:

1. Sistem Konversi Energi dan Metabolisme Kerja: Mempelajari bagaimana tubuh menghasilkan adenosin trifosfat (ATP) melalui jalur aerobik dan anaerobik untuk menggerakkan otot-otot rangka selama bekerja, serta menghitung total pengeluaran energi (*energy expenditure*) dari suatu aktivitas.
2. Fungsi Kardiovaskular dan Respiratori: Menganalisis perubahan laju denyut jantung (*heart rate*), tekanan darah, volume sekuncup (*stroke volume*), dan konsumsi oksigen (VO_2) sebagai respons langsung terhadap pemenuhan kebutuhan nutrisi dan oksigen oleh jaringan otot yang aktif.
3. Fisiologi Otot dan Neuromuskular: Mengkaji mekanisme kontraksi otot, baik secara statis (kontraksi isometrik tanpa gerakan nyata, seperti memegang alat dalam waktu lama) maupun dinamis (kontraksi isotonik dengan

gerakan, seperti mengangkat barang), serta dampaknya terhadap kelelahan otot lokal.

4. Kelelahan Kerja (*fatigue*) dan Proses Pemulihan (*Recovery*): Mengidentifikasi indikator terjadinya kelelahan fisik, akumulasi asam laktat, serta menentukan pola dan durasi waktu istirahat yang ideal agar fungsi tubuh pekerja dapat kembali ke kondisi semula sebelum mengalami degradasi performa.

4.1.2 Hubungan Kapasitas Kerja, Beban Kerja, dan Lingkungan Kerja

Keberhasilan implementasi ergonomi di tempat kerja sangat ditentukan oleh interaksi harmonis antara tiga variabel utama, yaitu Kapasitas Kerja (*Work Capacity*), Beban Kerja (*Workload*), dan Lingkungan Kerja (*Work Environment*). Ketiga elemen ini membentuk suatu ekosistem yang saling memengaruhi; ketidakseimbangan pada salah satu variabel akan langsung mengekspos pekerja pada risiko *overstrain* (ketegangan berlebih) dan cedera (Bridger, Kilminster and Slaven, 2008).

Hubungan fungsional dan interaksi dari ketiga komponen tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Kapasitas Kerja (*Work Capacity*)
Kapasitas kerja dinilai sebagai kemampuan total dan batas kemampuan tertinggi seorang pekerja untuk merespons beban fisik yang diberikan. Kapasitas ini bertindak sebagai benteng pertahanan biologis pekerja. Variabel ini bersifat personal dan sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama:
 - a. Faktor Personal: Meliputi usia (kapasitas fisik umumnya menurun setelah usia 30-35 tahun), jenis

kelamin (kapasitas aerobik wanita rata-rata 30% lebih rendah dibanding pria karena massa otot dan volume hemoglobin), ukuran antropometri tubuh, status gizi, dan tingkat kebugaran kardiorespirasi ($VO_2 \max$).

- b. Faktor Kemampuan: Meliputi tingkat keterampilan, pengalaman kerja, dan adaptasi psikologis pekerja terhadap jenis tugas yang dihadapi.

2. Beban Kerja (*Workload*)

Beban kerja merupakan akumulasi dari seluruh tuntutan objektif yang bersumber dari karakteristik tugas yang harus diselesaikan oleh pekerja. Dalam perspektif fisiologi kerja, beban kerja fisik diklasifikasikan berdasarkan intensitas energi yang dibutuhkan untuk menyelesaikannya. Komponen beban kerja ini mencakup:

- a. Karakteristik Tugas: Bobot material yang diangkat, frekuensi pemindahan, jarak angkut, posisi tubuh saat bekerja (*posture*), serta durasi waktu penyelesaian tugas.
- b. Karakteristik Organisasi: Pengaturan jam kerja, sistem beralih (*shift*), kecepatan lini produksi, dan jatah waktu istirahat yang dialokasikan oleh manajemen.

3. Lingkungan Kerja (*Work Environment*)

Lingkungan kerja bertindak sebagai faktor eksternal atau *multiplier factor* yang dapat melipatgandakan beban fisiologis pekerja. Lingkungan fisik yang tidak ergonomis tidak hanya mengganggu kenyamanan, tetapi secara langsung memengaruhi metabolisme tubuh. Sebagai contoh, lingkungan kerja yang panas dan lembap (*heat stress*) memaksa sistem sirkulasi darah bekerja ganda:

menyuplai oksigen ke otot yang bekerja sekaligus mengalirkan darah ke kulit untuk membuang panas tubuh lewat keringat (Grandjean, 1993). Akibatnya, denyut jantung pekerja akan meningkat jauh lebih cepat dibandingkan saat bekerja di ruangan bersuhu nyaman, meskipun jenis dan bobot pekerjaannya sama. Selain faktor termal, kebisingan, getaran mekanis (*vibration*), dan pencahayaan yang buruk juga berkontribusi meningkatkan ketegangan fisiologis pekerja.

Secara konseptual, prinsip dasar ergonomi menyatakan bahwa agar suatu sistem kerja dinilai aman, sehat, dan produktif, maka total akumulasi dari beban kerja fisik ditambah efek paparan lingkungan kerja tidak boleh melebihi kapasitas kerja fisiologis yang dimiliki oleh individu tersebut:

Beban kerja + Faktor lingkungan ≤ Kapasitas Kerja

Tabel 4. 1 Klasifikasi Kondisi Sistem Kerja Berdasarkan Dampak Fisiologis dan Konsekuensi terhadap Kerja

Kondisi Sistem	Dampak Fisiologis	Konsekuensi terhadap kerja
Seimbang / Optimum	Tubuh mampu mempertahankan homeostasis; pasokan energi dan oksigen ke otot terpenuhi dengan baik.	Produktivitas stabil, tingkat kesalahan (<i>human error</i>) rendah, dan aman dari cedera jangka panjang.

Kondisi Sistem	Dampak Fisiologis	Konsekuensi terhadap kerja
Tidak Seimbang (<i>Overstrain</i>)	Denyut jantung melonjak drastis, asam laktat terakumulasi cepat, dan pemulihan melambat.	Penurunan efisiensi kerja, kelelahan akut, tingginya angka absensi, hingga risiko <i>Musculoskeletal Disorders</i> (MSDs).

Analisis fisiologi kerja bertujuan untuk melakukan intervensi: baik dengan menurunkan intensitas beban kerja (rekayasa alat bantu), mengendalikan paparan lingkungan (pemasangan ventilasi/pendingin), atau memastikan pekerja memiliki kapasitas yang sesuai melalui program kebugaran dan seleksi penempatan kerja yang tepat.

4.2 Sistem Metabolisme dan Konversi Energi Tubuh

Sistem metabolisme dan konversi energi tubuh merupakan motor penggerak utama dalam fisiologi kerja yang menjelaskan bagaimana tubuh manusia bertindak sebagai mesin biologis dalam mengubah energi kimia dari asupan nutrisi menjadi energi mekanik (Adenosin Trifosfat/ATP) untuk mendukung aktivitas otot rangka. Di dalam lingkungan kerja, pemahaman mengenai proses konversi energi ini sangat krusial karena laju metabolisme seseorang akan meningkat secara linear seiring dengan bertambahnya intensitas beban fisik yang diterima tubuh (Bridger, Kilminster and Slaven, 2008). Melalui pemetaan jalur metabolisme—baik secara

aerobik yang bergantung pada suplai oksigen maupun anaerobik saat intensitas kerja meningkat—manajemen dapat mengukur pengeluaran energi nyata (*energy expenditure*) pekerja secara objektif guna menentukan batas durasi kerja yang aman dan mencegah terjadinya kelelahan otot.

4.2.1 Metabolisme Basal vs. Metabolisme Kerja

Di dalam tubuh manusia, metabolisme merujuk pada seluruh proses kimiawi yang mengubah zat gizi dari makanan menjadi energi fungsional. Dalam ruang lingkup fisiologi kerja, pengeluaran energi total seorang pekerja dibagi menjadi dua kategori utama yang sangat kontras, yaitu Metabolisme Basal dan Metabolisme Kerja. Memahami perbedaan kedua jenis metabolisme ini sangat penting untuk menghitung kebutuhan kalori harian pekerja serta mengukur tingkat beban fisik dari suatu pekerjaan.

1. Metabolisme Basal (*Basal Metabolic Rate-BMR*)

Metabolisme Basal adalah jumlah energi minimum yang dibutuhkan oleh tubuh untuk menjalankan fungsi-fungsi vitalnya saat individu berada dalam kondisi istirahat total, terjaga, rileks secara mental, dan dalam lingkungan suhu yang nyaman (kondisi termonetral). Energi ini murni digunakan untuk mempertahankan kehidupan organ-organ dalam tanpa adanya aktivitas fisik tambahan (Astrand and Rodahl, 2004). Fungsi tubuh yang dibiayai oleh metabolisme basal meliputi:

- a. Denyut jantung dan sirkulasi darah.
- b. Proses pernapasan (paru-paru).
- c. Aktivitas otak dan sistem saraf.
- d. Fungsi filtrasi ginjal dan metabolisme hati (liver).

- e. Regenerasi sel dan pemeliharaan suhu inti tubuh ($\pm 37^{\circ}\text{C}$).

Nilai BMR bersifat konstan untuk individu tertentu pada hari yang sama, namun bervariasi antarindividu karena dipengaruhi oleh usia (menurun seiring bertambahnya usia), jenis kelamin (pria umumnya memiliki BMR lebih tinggi karena massa otot yang lebih besar), berat badan, dan komposisi tubuh. Umumnya, BMR manusia dewasa berkisar antara 1.0-1.2 kkal/menit atau sekitar 1.400 hingga 1.800 kkal/hari.

2. Metabolisme Kerja (*Work Metabolic Rate*)

Metabolisme Kerja adalah jumlah energi tambahan yang dikeluarkan oleh tubuh di atas nilai metabolisme basal untuk mendukung aktivitas fisik atau pemenuhan tugas-tugas mekanis selama bekerja. Ketika otot rangka mulai berkontraksi secara aktif untuk melakukan gerakan (seperti berjalan, mengangkat, memindahkan barang, atau mengoperasikan mesin), kebutuhan akan Adenosin Trifosfat (ATP) meningkat secara drastis.

Laju metabolisme kerja bersifat sangat dinamis dan berbanding lurus dengan intensitas serta durasi aktivitas yang dilakukan. Pengeluaran energi saat metabolisme kerja dihitung dengan rumus:

Metabolisme Kerja

$$= \text{Metabolisme total saat beraktivitas} \\ - \text{metabolisme basal}$$

Sebagai contoh, jika seseorang memiliki BMR sebesar 1.1 kkal/menit dan saat mencangkul tanah tubuhnya mengeluarkan total energi sebesar 6.5 kkal/menit, maka laju metabolisme kerja murninya untuk aktivitas mencangkul tersebut adalah 5.4 kkal/menit.

Tabel 4. 2 Perbandingan Karakteristik Metabolisme Basal dan Metabolisme Kerja

Karakteristik	Metabolisme Basal (BMR)	Metabolisme Kerja
Kondisi Tubuh	Istirahat total, berbaring, rileks, dan puasa ± 12 jam.	Aktif bergerak, otot berkontraksi melakukan tugas fisik.
Tujuan Penggunaan Energi	Mempertahankan fungsi organ vital (kelangsungan hidup).	Menghasilkan kerja mekanis dan pergerakan anggota tubuh.
Sifat Nilai	Cenderung konstan dan stabil pada individu yang sama.	Sangat fluktuatif, berubah mengikuti intensitas tugas.
Faktor Penentu Utama	Usia, jenis kelamin, hormon, dan massa otot bebas lemak.	Bobot beban, postur kerja, kecepatan, dan durasi kerja.
Nilai Pengeluaran Energi	Rendah (± 1.0 s.d. 1.2 kkal/menit).	Sedang hingga sangat tinggi (bisa mencapai > 10 kkal/menit).

Sumber: diolah dari (Astrand and Rodahl, 2004; Bridger, 2009)

Metabolisme kerja inilah yang menjadi parameter utama dalam analisis beban kerja fisik. Jika nilai metabolisme kerja seseorang terlalu tinggi dalam durasi yang lama, tubuh akan kehabisan cadangan glikogen otot dan mengalami penumpukan asam laktat, yang secara klinis diidentifikasi sebagai kelelahan kerja (fatigue). Pihak manajemen harus membatasi metabolisme kerja ini agar tidak melebihi 30–40% dari kapasitas kerja fisik maksimal $\text{VO}_2 \text{ max}$ pekerja selama 8 jam kerja sehari.

4.2.2 Sistem Kinerja Otot dan Pemenuhan Oksigen

Aktivitas kerja fisik pada dasarnya merupakan hasil dari serangkaian kontraksi terkoordinasi dari otot-otot rangka. Untuk mempertahankan kinerja otot ini dalam durasi tertentu, tubuh memerlukan pasokan energi konstan yang sangat bergantung pada efisiensi pemenuhan oksigen oleh sistem kardiorespirasi. Di dalam fisiologi kerja, pemahaman mengenai jenis kontraksi otot dan bagaimana oksigen didistribusikan menjadi kunci untuk menganalisis kelelahan dan merancang metode kerja yang aman.

1. Mekanisme Kinerja Otot

Saat pekerja melakukan tugas fisik, otot-otot rangka akan merespons melalui dua jenis kinerja mekanis yang berbeda, yaitu:

a. Kontraksi Dinamis (Isotonik)

Terjadi ketika otot memanjang atau memendek secara bergantian, menghasilkan gerakan nyata pada anggota tubuh. Contohnya : aktivitas berjalan, memindahkan barang dari satu meja ke meja lain,

atau menggerakkan tuas mesin. Kontraksi dinamis bertindak seperti "pompa" bagi pembuluh darah; peregangan dan pengencangan otot secara berkala justru membantu melancarkan aliran darah, sehingga pasokan oksigen dan pembuangan zat sisa (seperti asam laktat) berjalan lancar

b. Kontraksi Statis (Isometrik)

Terjadi ketika otot menegang untuk menahan suatu beban tanpa terjadi ketika otot menegang untuk menahan suatu beban tanpa menghasilkan gerakan atau perubahan panjang otot. Contohnya adalah menahan beban material di tangan, mempertahankan posisi membungkuk saat menyolder, atau memegang alat kerja dalam waktu lama. Kontraksi statis ini secara mekanis menekan pembuluh darah di sekitarnya. Akibatnya, aliran darah terhambat, otot kekurangan oksigen (iskemia), dan asam laktat menumpuk dengan sangat cepat, memicu rasa pegal dan kelelahan akut meski secara kasat mata pekerja tampak diam.

2. Pemenuhan Oksigen dan Laju Konsumsi Oksigen

Oksigen berperan sebagai bahan bakar utama dalam metabolisme aerobik di dalam sel otot untuk menghasilkan Adenosin Trifosfat (ATP). Ketika intensitas kerja fisik meningkat, kebutuhan otot akan ATP melonjak, yang secara linear menaikkan volume oksigen yang harus dihirup dan diedarkan oleh tubuh. Laju konsumsi oksigen ini disimbolkan sebagai $\dot{V}O_2$ (Volume Oksigen per menit). Proses pemenuhan oksigen selama bekerja melibatkan tiga tahapan sistemik (Bridger, Kilminster and Slaven, 2008):

- 1) Ventilasi (Paru-paru): Peningkatan laju dan kedalaman pernapasan untuk menarik lebih banyak oksigen dari udara bebas ke dalam alveoli.
- 2) Transportasi (Jantung & Darah): Jantung berdetak lebih cepat (heart rate meningkat) dan memompa darah lebih banyak (*stroke volume* naik) untuk mengalirkan hemoglobin yang mengikat oksigen menuju jaringan otot yang sedang aktif bekerja.
- 3) Ekstraksi (Sel Otot): Mitokondria di dalam sel otot menyerap oksigen dari darah untuk membakar glukosa atau glikogen otot menjadi energi bersih tanpa sisa asam laktat.

Setiap individu memiliki batas kemampuan maksimal dalam menghirup, mentransfer, dan menggunakan oksigen, yang dikenal sebagai VO_2 max (Kapasitas Aerobik Maksimal).

- a. Bekerja di Bawah Ambang Batas (Aerobik)
Jika beban kerja fisik berada di bawah 30–40% dari nilai VO_2 max pekerja, sistem kardiorespirasi mampu menyuplai oksigen secara seimbang (*steady state*). Pekerjaan dapat dipertahankan dalam waktu lama (misalnya 8 jam kerja) tanpa kelelahan ekstrem.
- b. Bekerja di Atas Ambang Batas (Anaerobik)
Jika beban kerja terlalu berat, kebutuhan oksigen otot melebihi kapasitas suplai maksimum tubuh. Otot terpaksa beralih ke jalur metabolisme anaerobik (tanpa oksigen) untuk menghasilkan energi darurat. Konsekuensinya, glukosa dipecah secara tidak sempurna dan menghasilkan produk sampingan berupa asam laktat.

Fenomena Hutang Oksigen (*Oxygen Debt*): Ketika pekerja berhenti melakukan aktivitas berat yang bersifat anaerobik, napas mereka akan tetap terengah-engah dan denyut jantung tetap tinggi untuk beberapa waktu selama fase istirahat. Tubuh sedang membayar hutang oksigen yang digunakan untuk mengoksidasi kembali akumulasi asam laktat di dalam otot menjadi glikogen atau membuangnya lewat sistem ekskresi (Tarwaka, Bakri and Sudiajeng, 2004).

4.3 Metode Pengukuran dan Analisis Beban Kerja Fisik

Metode pengukuran dan analisis beban kerja fisik merupakan instrumen evaluasi formal dalam ergonomi industri yang digunakan untuk menguantifikasi tingkat ketegangan fisiologis (*physiological strain*) yang dialami pekerja akibat tuntutan tugas fisik. Pendekatan analisis ini dibagi menjadi metode objektif, baik melalui pengukuran langsung menggunakan instrumen laboratorium seperti kardiograf untuk memantau laju denyut jantung (*heart rate*) dan analisis gas untuk mengukur konsumsi oksigen (VO_2), maupun pengukuran tidak langsung melalui perhitungan parameter kardiovaskular lapangan seperti metode *Cardiovascular Load* (%CVL). Pengondisian data kuantitatif tersebut, yang kerap dikombinasikan dengan skala penilaian subjektif seperti *Borg Rating of Perceived Exertion* (RPE), sangat krusial bagi manajemen untuk memetakan klasifikasi risiko.

4.3.1 Pengukuran Langsung (Kardiograf, Pemantau Konsumsi Oksigen)

Pengukuran langsung (*direct measurement*) merupakan metodologi evaluasi objektif dalam fisiologi kerja yang dilakukan dengan cara mengukur parameter biologis pekerja secara *real-time* menggunakan instrumen sensorik khusus saat aktivitas kerja berlangsung. Pendekatan ini menempati hierarki tertinggi dalam hal akurasi dan validitas data karena meminimalkan faktor estimasi atau bias subjektif. Di dalam lingkungan industri dan laboratorium ergonomi, dua instrumen utama yang menjadi standar emas (*gold standard*) untuk mengukur beban kerja fisik secara langsung adalah kardiograf dan alat pemantau konsumsi oksigen (*respiratory gas analyzer*).

Pengukuran kardiograf. Kardiograf, yang umumnya diaplikasikan dalam bentuk *Electrocardiograph* (ECG/EKG) *portabel* atau *ambulatory* ECG monitoring (seperti *Holter monitor* dan *wireless heart rate monitor*), digunakan untuk merekam aktivitas kelistrikan jantung pekerja secara kontinu. Pengukuran langsung ini berfokus pada dinamika frekuensi denyut jantung (*heart rate*) yang dinyatakan dalam satuan beats per minute (bpm).

Pengukuran Menggunakan Pemantau Konsumsi Oksigen (*Respiratory Gas Analyzer*). Pemantau konsumsi oksigen adalah instrumen yang digunakan untuk mengukur volume oksigen yang dihirup dan volume karbon dioksida yang diekskresikan oleh pekerja per satuan waktu (VO_2 dan VCO_2). Pengukuran ini merupakan indikator paling valid untuk menentukan laju pengeluaran energi total (*gross energy expenditure*) selama aktivitas fisik berlangsung. Pekerja

diwajibkan menggunakan masker khusus (*face mask*) yang dihubungkan ke alat analisis gas portabel (biasanya berbentuk tas punggung ringan). Alat ini mengukur laju aliran udara pernapasan (*ventilation rate*) dan menganalisis fraksi konsentrasi Oksigen (O_2) serta Karbon Dioksida (CO_2) pada udara ekspirasi.

4.3.2 Pengukuran Tidak Langsung (Metode Perhitungan Denyut Nadi Kerja)

Pengukuran tidak langsung (*indirect measurement*) merupakan methodology evaluasi beban kerja fisik yang paling banyak diaplikasikan di lapangan karena sifatnya yang praktis, ekonomis, dan tidak mengganggu aktivitas alami pekerja (*non-destructive*). Metode ini didasarkan pada hubungan linear yang kuat antara laju konsumsi oksigen (VO_2), pengeluaran energi, dan frekuensi denyut nadi. Melalui pemantauan denyut nadi kerja secara berkala, investigator dapat mengestimasi tingkat ketegangan fisiologis (*physiological strain*) yang dialami oleh sistem kardiovaskular pekerja tanpa perlu menggunakan instrumen laboratorium yang kompleks.

Pengukuran Denyut Nadi Kerja

Pengukuran denyut nadi dilakukan pada arteri yang dekat dengan permukaan kulit, umumnya pada arteri radialis (pergelangan tangan) atau arteri karotis (leher). Dalam praktik ergonomi industri, terdapat beberapa teknik penghitungan

1. Metode Palpasi Manual: Penghitungan dilakukan secara manual menggunakan tiga jari (telunjuk, tengah, manis) pada titik arteri selama interval waktu tertentu (misalnya

15 detik, kemudian hasilnya dikalikan 4 untuk mendapatkan satuan beats per minute/bpm). Untuk meminimalkan kesalahan akibat penurunan denyut nadi yang cepat setelah pekerja berhenti, penghitungan harus dilakukan segera dalam waktu 15 hingga 30 detik pertama fase istirahat.

2. Metode Telemetry (*Heart Rate Monitor*): Menggunakan *sensor chest strap* atau jam tangan pintar (*smartwatch/optical heart rate sensor*) berbasis fotopletismografi (PPG). Metode ini dikategorikan sebagai pengukuran tidak langsung jika data denyut nadi hanya digunakan sebagai prediktor variabel pengeluaran energi melalui persamaan estimasi, bukan analisis kelistrikan jantung formal.

Parameter Denyut Nadi dalam Fisiologi Kerja

Untuk melakukan analisis beban kerja fisik yang valid, terdapat empat (4) parameter denyut nadi utama yang harus diukur dan didokumentasikan:

1. Denyut Nadi Istirahat (*Resting Heart Rate*)
Rata-rata denyut nadi pekerja sebelum melakukan aktivitas, diukur saat kondisi tubuh rileks dan tenang.
2. Denyut Nadi Kerja (*Working Heart Rate*)
Rata-rata denyut nadi pekerja selama berada dalam siklus operasional tugasnya. Parameter ini merefleksikan total beban kerja fisik ditambah pengaruh lingkungan fisik tempat kerja.
3. Denyut Nadi Maksimum (*Maximum Heart Rate*)
Batas atas kemampuan kardiovaskular individu yang dihitung berdasarkan pendekatan formula usia, yaitu:

$$HR_{maks} = 220 - usia$$

$$HR_{maks} = 260 - (0,62 \times usia) \text{ atau}$$

$$HR_{maks} = 190 - 0,62 \times (usia - 25)$$

4. Denyut Nadi Pemulihan (*Recovery Heart Rate*)

Laju penurunan denyut nadi setelah aktivitas kerja dihentikan. Kecepatan penurunan ini merupakan indikator tingkat kebugaran fisik pekerja; semakin cepat denyut nadi kembali ke kondisi basal, semakin baik kapasitas pemulihan pekerja tersebut.

Metode *Ten-Pulse* dan Evaluasi Brouha

Dua metode tidak langsung yang sangat populer untuk mengevaluasi tingkat kelelahan kerja di lantai produksi berdasarkan denyut nadi adalah:

1. Metode *Ten-Pulse Count* (10 denyut)

Teknik penghitungan cepat di mana investigator mengukur waktu yang dibutuhkan jantung pekerja untuk berdetak sebanyak 10 kali menggunakan *stopwatch*. Nilai denyut nadi per menit kemudian dihitung dengan rumus:

$$\text{denyut nadi (bpm)} = \frac{10}{\text{waktu}} \times 60$$

bpm = beats per minute

2. Kriteria Brouha (*Brouha's Physiological Assessment*)

Metode ini mengevaluasi kelelahan sistemik dengan mengukur denyut nadi pemulihan pada tiga interval waktu setelah pekerjaan selesai: menit ke-1 (P1), menit ke-2 (P2), dan menit ke-3 (P3). Jika nilai P1 melebihi 110 bpm atau selisih antara P1 dan P3 kurang dari 10 bpm, hal tersebut mengindikasikan bahwa beban kerja fisik berada

pada tingkat yang tidak dapat ditoleransi (*unacceptable workload*) dan akumulasi kelelahan sedang terjadi.

Tabel 4. 3 Evaluasi Beban kerja Fisik Berdasarkan Denyut Jantung

Klasifikasi Pekerjaan	Denyut Jantung/Menit
Ringan	90
Agak ringan	100
Berat	120
Sangat berat	140
Am,at sangat berat	160

Sumber: (Kroemer et al, 2001)

Besar energi yang dikeluarkan untuk suatu pekerjaan dapat diukur dengan memperhitungkan denyut jantung dan faktor demografi. Model persamaan untuk menghitung beban kerja menurut beberapa ahli:

1. Kamalakannan (2007)

$$E_{cost} = -1867 + 8.58HR + 25.1HT + 4.5A - 7.4RHR + 67.8G$$

$$MWR = -1967 + 8.58HR + 25.1HT + 4.50A - 7.47RHR + 67.8G$$

Keterangan:

E_{cost} = beban kerja (watt)

HR = denyut jantung saat bekerja (bpm)

HT = tinggi badan (inci)

A = usia (tahun)

RHR = denyut jantung saat istirahat

G = jenis kelamin (m = 0, f = 1)

MWR = *metabolic work rate* (watt)

1 watt setara dengan 0.0143 kkal/menit

2. Keytel (2005) dalam (Iridiastadi and Yassierli, 2014)

$$E_{cost} = -55.0959 + 0.6309HR + 0.1988W + 0.2017A$$

$$EE = -20.4022 + 0.4472HR - 0.1263W + 0.074A$$

Keterangan:

E_{cost} = beban kerja (KJ/menit)

W = bobot badan (kg)

1 KJ/menit setara dengan 0.239 kkal/menit

3. Rakhmaniar (2007)

$$Y = 0.014HR + 0.017W - 1.706$$

Keterangan:

Y = konsumsi oksigen (liter/menit)

HR = denyut jantung saat bekerja (denyut/menit)

W = bobot badan (kg)

Tabel 4. 4 Klasifikasi Kategori Beban Kerja Berdasarkan Konsumsi Energi

Kategori Beban Kerja	Laju Pengeluaran Energi (kkal/menit)	Laju Pengeluaran Energi (kkal/8 jam kerja)	Contoh Aktivitas Kerja Industri
Sangat Ringan	< 2,5	< 1.200	Bekerja di depan komputer, menulis, administrasi meja, mengawasi panel kendali otomatis.

Kategori Beban Kerja	Laju Pengeluaran Energi (kkal/menit)	Laju Pengeluaran Energi (kkal/8 jam kerja)	Contoh Aktivitas Kerja Industri
Ringan	2,5 - < 5,0	1.200 - < 2.400	Mengetik cepat, merakit komponen elektronika kecil dalam posisi duduk, menyetir kendaraan ringan.
Sedang	5,0 - < 7,5	2.400 - < 3.600	Mencangkul ringan, mengecat dinding, mengangkat material berbobot ringan secara berkala, berjalan konstan.
Berat	7,5 - < 10,0	3.600 - < 4.800	Menggergaji kayu manual, mengangkat dan memindahkan karung semen,

Kategori Beban Kerja	Laju Pengeluaran Energi (kkal/menit)	Laju Pengeluaran Energi (kkal/8 jam kerja)	Contoh Aktivitas Kerja Industri
			menempa besi, mencangkul tanah keras.
Sangat Berat	$\geq 10,0$	≥ 4.800	Menebang pohon besar manual, memanjat tiang dengan beban berat, aktivitas penyelamatan darurat, pandai besi manual.

Selain evaluasi besar energi (konsumsi energi) yang dibutuhkan, besar beban fisiologis dapat pula dievaluasi dengan cara konsumsi oksigen saat pekerja tengah melakukan pekerjaan, kemudian membandingkan dengan $VO_{2\text{maks}}$ pekerja tersebut. Menurut Yuliani (2010), model persamaan konsumsi oksigen (VO_2), yaitu:

$$VO_2 = 1.168 + 0.20HR - 0.035A + 0.019W \left(\frac{\text{liter}}{\text{menit}} \right) \text{ untuk pria}$$

$$VO_2 = -1.991 + 0.013A + 0.024W \left(\frac{\text{liter}}{\text{menit}} \right) \text{ untuk wanita}$$

Keterangan;

VO_2 = konsumsi oksigen (liter/menit)

HR = denyut jantung (denyut/menit)

A = usia (tahun)

W = bobot badan (kg)

4.3.3 Metode Analisis Beban Kardiovaskular (%CVL - *Cardiovascular Load*)

Merupakan salah satu teknik analisis tidak langsung yang paling valid dan aplikatif dalam bidang ergonomi industri untuk menguantifikasi tingkat beban kerja fisik berdasarkan respons sistem kardiovaskular. Pengukuran ini mengevaluasi seberapa besar kapasitas sirkulasi darah pekerja yang terpakai untuk menyelesaikan suatu tugas spesifik. Keunggulan utama metode %CVL adalah kemampuannya untuk mengompensasi faktor perbedaan usia pekerja, sehingga penilaian beban kerja menjadi lebih objektif dan personal dibandingkan hanya melihat nilai rata-rata denyut nadi kerja mutlak.

Untuk menentukan persentase beban kardiovaskular pekerja, data denyut nadi yang telah dikumpulkan melalui metode palpasi atau telemetri dimasukkan ke dalam formula berikut

$$\%CVL = \frac{HR_{kerja} - HR_{istirahat}}{HR_{maks} - HR_{istirahat}} \times 100$$

Tabel 4. 5 Klasifikasi Beban Kerja Fisik Berdasarkan Nilai %CVL

Nilai %CVL	Klasifikasi Beban Kerja	Rekomendasi / Tindakan Korektif
< 30%	Tidak Terjadi Kelelahan	Aman untuk bekerja, tidak diperlukan tindakan perbaikan.
30% - < 60%	Diperlukan Perbaikan	Sistem kerja perlu diperbaiki (ringan), namun belum mendesak.
60% - < 80%	Kerja dalam Waktu Singkat	Beban fisik berat; diperlukan tindakan perbaikan mekanis atau pengaturan rotasi kerja secepatnya.
80% - < 100%	Perbaikan Segera	Risiko kardiovaskular tinggi; diperlukan tindakan darurat/perbaikan stasiun kerja seketika.
≤ 100%	Tidak Diizinkan Bekerja	Pekerjaan harus dihentikan total karena dapat memicu kegagalan jantung atau cedera fatal.

4.3.4 Metode Subjektif (Skala Persepsi Beban Kerja / *Borg RPE Scale*)

Metode subjektif digunakan untuk mengukur intensitas beban kerja fisik berdasarkan persepsi dan sensasi langsung yang dirasakan oleh pekerja saat menyelesaikan tugasnya. Instrumen standar internasional yang paling valid, reliabel, dan banyak digunakan untuk tujuan ini adalah Skala Borg RPE

(*Rating of Perceived Exertion*) yang dikembangkan oleh Gunnar Borg (Borg, 1990)

Skala utama yang digunakan dalam fisiologi kerja adalah Skala Borg 6–20 (Skala Borg Klasik). Pemilihan angka 6 hingga 20 ini tidak dilakukan secara acak, melainkan dirancang agar berkorelasi linear dengan denyut jantung nyata pekerja yang sehat. Secara teoretis, perkalian nilai skala Borg dengan angka 10 akan memberikan estimasi kasar dari laju denyut jantung (*heart rate*) pekerja pada momen tersebut:

$$\begin{aligned} & \text{Estimasi Denyut jantung (bpm)} \\ & = \text{Nilai Skala Borg RPE} \times 10 \end{aligned}$$

Sebagai contoh, jika seorang pekerja menilai beban tugasnya berada pada angka 12 (*Somewhat hard*), maka denyut jantung aktual pekerja tersebut diperkirakan berada di kisaran 120 bpm.

Tabel 4. 6 Skala RPE

Skala	Deskripsi	Estimasi Denyut Jantung
6	Tidak ada usaha sama	60
7,5	Amat sangat ringan	70-80
9	Sangat ringan	90-100
11	Ringan	110-120
13	Agak berat	130-140
15	Berat	150-160
17	Sangat berat	170-180
19	Amat sangat berat	190
20	Usaha maksimal	200

Sumber: (Kroemer et al., 2001)

Keunggulan Metode Subjektif

1. Metodologi yang Praktis

Tidak memerlukan peralatan sensorik yang menempel pada tubuh pekerja, sehingga risiko terjadinya distorsi perilaku kerja alami akibat gangguan alat (Hawthorne effect) dapat dieliminasi.

2. Deteksi Dini *Overstrain*

Berguna untuk mengidentifikasi beban kerja mental (*mental workload*) atau kelelahan lokal yang mungkin tidak tertangkap secara penuh oleh indikator denyut jantung global (misalnya, stres statis pada otot leher saat mengelas).

3. Pendekatan Triangulasi Data

Metode subjektif ini sering kali dikombinasikan dengan metode objektif (seperti rumus %CVL). Jika terdapat diskrepansi yang signifikan antara nilai %CVL (misal: kategori ringan) dan skala Borg (misal: kategori berat/16), investigator dapat mendeteksi adanya faktor perancu eksternal seperti kondisi psikologis pekerja yang buruk atau paparan lingkungan kerja (panas/bising) yang ekstrem.

4.4 Analisis Kelelahan Kerja (*Fatigue*) dan Pemulihan

Analisis kelelahan kerja (*fatigue*) dan pemulihan merupakan instrumen evaluasi kritis dalam fisiologi kerja yang berfungsi untuk mendeteksi, mengukur, dan mengendalikan penurunan kapasitas fungsional tubuh pekerja akibat paparan beban kerja yang berlebihan. Secara

komprehensif, faktor-faktor penyebab kelelahan fisik akibat kerja dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama:

4.4.1 Faktor Karakteristik Tugas (*Task Demand*)

Jenis kerja fisik yang dilakukan pekerja menjadi penentu utama seberapa cepat energi mereka akan habis, ditentukan oleh:

1. Intensitas dan Durasi Beban Kerja: Pekerjaan yang menuntut pengeluaran energi melebihi ambang batas aerobik (kategori berat hingga sangat berat > 7,5 kkal/menit dalam durasi yang panjang akan mempercepat habisnya cadangan glikogen otot dan memicu akumulasi meningkatnya asam laktat.
2. Jenis Kontraksi Otot (Statis vs. Dinamis): Tugas-tugas yang didominasi oleh kontraksi statis akan lebih cepat lelah.
3. Frekuensi Gerakan (Repetitif): Aktivitas yang melibatkan gerakan berulang secara konstan pada kelompok otot yang sama dengan waktu pemulihan yang sangat singkat di antara siklus gerakan (misalnya pada lini perakitan manual).

4.4.2 Faktor Lingkungan Kerja (*Environmental Stressors*)

Paparan kondisi fisik di stasiun kerja bertindak sebagai katalis yang memperberat beban fisiologis sistem kardiovaskular:

1. Tekanan Panas (*Heat Stress*): Bekerja di lingkungan dengan suhu ekstrem memaksa tubuh melakukan vasodilatasi pembuluh darah kulit untuk evaporasi keringat. Hal ini memicu pembagian curah jantung (*cardiac output*) antara otot dan kulit, yang berakibat

pada peningkatan denyut jantung kerja (HR_{kerja}) secara drastis meskipun beban mekanis tugas tetap konstan.

2. Kebisingan dan Getaran: Paparan kebisingan intensitas tinggi memicu stres psikofisik dan mengaktivasi sistem saraf simpatis. Sementara itu, getaran alat kerja (*hand-arm vibration*) memaksa otot melakukan kontraksi mikro tambahan (*tonic vibration reflex*) untuk mempertahankan stabilitas genggaman, yang mempercepat kelelahan neuromuskular.

4.4.3 Faktor Personal / Individu (*Individual Factors*)

Kapasitas fungsional internal setiap individu menentukan ambang batas toleransi terhadap paparan beban kerja:

1. Kapasitas Aerobik Maksimal (VO_2 maks): Pekerja dengan tingkat kebugaran fisik yang rendah memiliki nilai VO_2 Maks yang kecil, sehingga mereka lebih cepat menyentuh ambang batas anaerobik dalam menghadapi beban kerja tertentu.
2. Usia dan Jenis Kelamin: Secara fisiologis, kapasitas kerja fisik dan massa otot bebas lemak mengalami penurunan pasca-usia 30–40 tahun. Perbedaan gender juga memengaruhi kapasitas otot intrinsik karena variasi antropometri dan komposisi hormonal.
3. Status Nutrisi dan Pola Istirahat: Kurangnya asupan kalori harian memicu defisit energi kronis, sementara gangguan tidur (*sleep deprivation*) menghambat fase pemulihan anabolik sistem saraf pusat, sehingga pekerja memulai giliran kerja dalam kondisi pemulihan yang tidak tuntas (*incomplete recovery*).

DAFTAR PUSTAKA

- Astrand, P.. and Rodahl, K. (2004) *Textbook of Work Physiology*. 4th edn. New York: McGraw Hill.
- Bridger, R.S. (2009) *Introduction to Ergonomics 3rd Ed*. USA: CRC Press.
- Bridger, R.S., Kilminster, S. and Slaven, G. (2008) 'Occupational Stress and Strain in the Naval Service:1999 and 2024', *Occupational Madicine*, 57, pp. 92–97.
- Grandjean, E. (1993) *Fitting the Task to the Man*. 4th edn. London: Taylor & Francis Inc.
- Iridiastadi, H. and Yassierli (2014) *Ergonomi Suatu Pengantar*. Edited by Nia. Bandung: PT Remaja Rosdakarya.
- Kamalakannan, B. (2007) 'Predictive Models for Estimating Metabolic on Heart rate and Physical Characteristic', *The Journal of SH&E Researc*, 4(1).
- Kroemer, K.H., Kroemer, H.J. and Kroemer, K.. (2001) *Ergonomics: How to Design for Ease and Efficiency*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Manuaba (2000) 'Ergonomi, Kesehatan dan Keselamatan Kerja', in S. Wignyosubroto and E. Wiranto, Stefanus (eds) *Proceeding Seminar Nasional Ergonomi 2000*. Surabaya: Guna Wijaya, pp. 1–4.
- Suma'mur (2020) *Keselamatan Kerja dan Pencegahan Kecelakaan Kerja*. Jakarta: Sagung Seto.
- Tarwaka (2015) *Ergonomi Industri Dasar-Dasar Pengetahuan Ergonomi Dan Aplikasi di Tempat Kerja*. Surakarta: Harapan press.
- Tarwaka, Bakri, S.H. and Sudiajeng, L. (2004) *Ergonomi Untuk Keselamatan, Kesehatan Kerja dan Produktivitas*.

BAB 5

HUMAN INFORMATION PROCESSING DALAM ERGONOMIKA

Oleh Luki Hernando

5.1 *Human Information Processing* dan Ergonomika dalam Sistem Kerja

5.1.1 Human Information Processing

Perkembangan teknologi dan sistem kerja modern telah membawa perubahan besar terhadap interaksi manusia dengan mesin, perangkat digital, serta lingkungan kerja. Pada era industri modern, manusia tidak hanya dituntut melakukan pekerjaan fisik, tetapi juga menghadapi tuntutan kognitif yang semakin kompleks. Operator, pekerja industri, tenaga kesehatan, hingga pengguna sistem informasi harus mampu menerima, memahami, mengolah, dan merespons informasi secara cepat dan tepat. Kondisi ini menjadikan *Human Information Processing* (HIP) sebagai salah satu konsep penting dalam ergonomika modern (Wickens *et al.*, 2021).

Human Information Processing merupakan pendekatan yang menjelaskan bagaimana manusia menerima informasi melalui indera, memproses informasi di dalam otak, menyimpan informasi dalam memori, serta menghasilkan

keputusan atau tindakan tertentu. Konsep ini berkembang dari ilmu psikologi kognitif dan banyak diterapkan dalam ergonomika untuk memahami kemampuan serta keterbatasan manusia dalam bekerja. Dalam praktiknya, manusia dipandang sebagai suatu sistem pemroses informasi yang memiliki tahapan *input*, *processing*, *storage*, dan *output*, mirip dengan sistem komputer, namun dipengaruhi oleh faktor biologis, psikologis, dan lingkungan (Helander, 2006).

Penerapan *Human Information Processing* sangat penting dalam perancangan sistem kerja yang ergonomis. Kesalahan dalam desain informasi, tampilan antarmuka, pencahayaan, kebisingan, maupun kompleksitas tugas dapat meningkatkan beban mental pekerja dan memicu terjadinya *human error*. Dalam berbagai sektor industri, *human error* sering menjadi penyebab utama kecelakaan kerja, penurunan produktivitas, serta kegagalan sistem. Oleh karena itu, pemahaman mengenai bagaimana manusia memproses informasi menjadi dasar dalam menciptakan sistem kerja yang aman, nyaman, efektif, dan efisien (Salvendy, 2012).

Selain itu, perkembangan teknologi digital seperti *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), dan otomatisasi industri semakin meningkatkan kebutuhan terhadap pendekatan ergonomi kognitif. Sistem kerja modern menuntut manusia untuk berinteraksi dengan berbagai perangkat digital yang memerlukan perhatian, konsentrasi, dan kemampuan pengambilan keputusan secara cepat. Jika sistem dirancang tanpa mempertimbangkan kapasitas kognitif manusia, maka dapat terjadi *information*

overload yang berdampak pada stres kerja dan kelelahan mental (Norman, 2013).

Dengan demikian, *Human Information Processing* menjadi salah satu fondasi penting dalam ergonomika karena berfokus pada interaksi antara kemampuan kognitif manusia dengan tuntutan sistem kerja. Melalui pemahaman konsep ini, organisasi dapat merancang lingkungan kerja yang lebih adaptif terhadap kemampuan manusia sehingga mampu meningkatkan keselamatan, kenyamanan, produktivitas, dan kualitas kerja (Bridger, 2018).

5.1.2 Peran Ergonomika dalam Sistem Kerja

Ergonomika merupakan disiplin ilmu yang mempelajari interaksi antara manusia dengan elemen lain dalam suatu sistem kerja. Tujuan utama ergonomika adalah menyesuaikan pekerjaan, alat, mesin, lingkungan, dan sistem dengan kemampuan serta keterbatasan manusia agar tercipta kondisi kerja yang aman, nyaman, sehat, dan produktif (Grandjean & Kroemer, 2009). Dalam konteks modern, ergonomika tidak hanya berfokus pada aspek fisik, tetapi juga melibatkan aspek kognitif dan organisasi.

Peran ergonomika dalam sistem kerja sangat penting karena manusia merupakan pusat dari seluruh aktivitas kerja. Sistem kerja yang tidak dirancang secara ergonomis dapat menyebabkan kelelahan, cedera kerja, stres mental, serta penurunan performa kerja. Oleh sebab itu, ergonomika hadir sebagai pendekatan untuk menciptakan keseimbangan antara manusia, teknologi, dan lingkungan kerja (Wilson & Corlett,

2005). Dalam *Human Information Processing*, ergonomika memiliki peran dalam mengoptimalkan proses penerimaan dan pengolahan informasi oleh manusia. Desain tampilan visual, tata letak kontrol, warna indikator, alarm suara, hingga penyajian informasi pada layar digital harus disesuaikan dengan karakteristik persepsi dan kemampuan kognitif manusia. Sebagai contoh, penggunaan warna yang terlalu kompleks pada panel kontrol dapat membingungkan operator dan meningkatkan risiko kesalahan pengambilan keputusan (Wickens *et al.*, 2021). Selain itu, ergonomika juga berperan dalam mengurangi beban kerja mental. Pekerjaan yang menuntut perhatian tinggi secara terus-menerus dapat menyebabkan *mental fatigue* atau kelelahan mental. Kondisi tersebut dapat menurunkan konsentrasi, memperlambat respons, dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja. Oleh karena itu, ergonomika membantu merancang sistem kerja yang mampu mendukung performa kognitif manusia melalui pengaturan waktu kerja, penyederhanaan informasi, serta desain antarmuka yang mudah dipahami. Dalam perkembangan industri modern dan transformasi digital, ergonomika semakin dibutuhkan dalam perancangan *human-machine interaction*. Interaksi antara manusia dan teknologi harus mempertimbangkan kenyamanan pengguna agar sistem dapat dioperasikan secara efektif. Pendekatan ergonomika juga mendukung pengembangan teknologi berbasis pengguna (*user-centered design*) yang menempatkan kebutuhan manusia sebagai prioritas utama (Norman, 2013).

Dengan demikian, ergonomika memiliki peran strategis dalam meningkatkan kualitas sistem kerja melalui pendekatan yang berorientasi pada manusia. Integrasi

ergonomika dengan *Human Information Processing* dapat membantu organisasi menciptakan sistem kerja yang lebih efisien, aman, dan adaptif terhadap perkembangan teknologi (Salvendy, 2012).

5.1.3 Hubungan Manusia, Mesin, dan Lingkungan

Dalam suatu sistem kerja, manusia, mesin, dan lingkungan merupakan tiga komponen utama yang saling berinteraksi dan memengaruhi satu sama lain. Ketiga elemen tersebut membentuk suatu sistem terpadu yang menentukan keberhasilan suatu pekerjaan. Ergonomika memandang bahwa efektivitas dan efisiensi kerja sangat dipengaruhi oleh kesesuaian hubungan antara manusia, mesin, dan lingkungan kerja (Grandjean & Kroemer, 2009).

Manusia berperan sebagai pengendali utama dalam sistem kerja karena memiliki kemampuan berpikir, mengambil keputusan, dan melakukan tindakan berdasarkan informasi yang diterima. Namun, manusia juga memiliki keterbatasan fisik dan kognitif seperti keterbatasan perhatian, kapasitas memori, kecepatan reaksi, dan kemampuan persepsi. Oleh karena itu, mesin dan lingkungan kerja harus dirancang sesuai dengan karakteristik manusia (Bridger, 2018).

Mesin berfungsi sebagai alat bantu untuk meningkatkan kemampuan kerja manusia. Perkembangan teknologi telah menghasilkan berbagai mesin dan sistem otomatisasi yang mampu meningkatkan produktivitas dan efisiensi kerja. Akan tetapi, desain mesin yang tidak ergonomis dapat menyebabkan kesalahan operasional, kelelahan, bahkan kecelakaan kerja. Oleh sebab itu, interaksi

manusia dan mesin harus dirancang secara harmonis melalui pendekatan *human-centered design* (Norman, 2013).

Lingkungan kerja juga memiliki pengaruh besar terhadap performa manusia dalam memproses informasi. Faktor lingkungan seperti pencahayaan, suhu, kebisingan, getaran, dan kualitas udara dapat memengaruhi konsentrasi, kenyamanan, dan kemampuan pengambilan keputusan pekerja. Misalnya, tingkat kebisingan yang tinggi dapat mengganggu komunikasi dan perhatian operator sehingga meningkatkan risiko *human error* (Wilson & Corlett, 2005).

Hubungan antara manusia, mesin, dan lingkungan menjadi semakin kompleks pada era digital dan otomatisasi industri. Operator modern tidak hanya berinteraksi dengan mesin fisik, tetapi juga dengan sistem komputer, dashboard digital, sensor pintar, dan teknologi berbasis *Artificial Intelligence*. Dalam kondisi ini, *Human Information Processing* menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa informasi yang diterima manusia dapat dipahami dan direspons dengan baik (Wickens *et al.*, 2021).

Pendekatan ergonomika bertujuan menciptakan keseimbangan antara manusia, mesin, dan lingkungan sehingga tercipta sistem kerja yang optimal. Sistem yang ergonomis mampu meningkatkan produktivitas, keselamatan kerja, kenyamanan, serta kesejahteraan pekerja secara keseluruhan (Salvendy, 2012).

5.2 Konsep Dasar *Human Information Processing*

5.2.1 Definisi *Human Information Processing*

Human Information Processing (HIP) merupakan konsep yang menjelaskan bagaimana manusia menerima, mengolah, menyimpan, dan menggunakan informasi untuk menghasilkan tindakan atau keputusan tertentu. Konsep ini berkembang dari kajian psikologi kognitif dan ergonomika yang memandang manusia sebagai sistem pemroses informasi yang memiliki kemampuan untuk menerima stimulus dari lingkungan, memprosesnya dalam otak, kemudian menghasilkan respons sesuai situasi yang dihadapi (Harris & Li, 2023).

Dalam ergonomika modern, *Human Information Processing* digunakan untuk memahami interaksi manusia dengan mesin, teknologi digital, dan lingkungan kerja. Setiap aktivitas kerja melibatkan proses penerimaan informasi melalui indera, pengolahan informasi secara kognitif, hingga tindakan yang dilakukan manusia. Misalnya, operator industri harus membaca tampilan monitor, memahami kondisi sistem, lalu mengambil keputusan operasional secara cepat dan tepat (Ng *et al.*, 2024).

Konsep HIP menjadi penting karena manusia memiliki keterbatasan dalam memproses informasi. Kapasitas perhatian manusia terbatas sehingga tidak semua informasi dapat diproses secara bersamaan. Selain itu, faktor seperti stres kerja, kelelahan mental, tekanan waktu, dan kompleksitas tugas dapat memengaruhi kualitas pemrosesan informasi serta meningkatkan risiko *human error* (Bellandi *et al.*, 2023).

Perkembangan teknologi digital seperti *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), dan sistem otomatisasi juga semakin meningkatkan pentingnya pemahaman mengenai HIP. Sistem modern membutuhkan desain yang sesuai dengan kemampuan kognitif manusia agar pengguna dapat memahami informasi dengan mudah dan mengurangi risiko kesalahan operasional (Zhu *et al.*, 2024).

Dengan demikian, *Human Information Processing* dapat dipahami sebagai proses kognitif manusia dalam menerima, mengolah, menyimpan, dan menghasilkan respons terhadap informasi dari lingkungan kerja maupun sistem teknologi. Pemahaman konsep ini menjadi dasar penting dalam ergonomika untuk menciptakan sistem kerja yang aman, nyaman, dan efisien (Das *et al.*, 2025).

5.2.2 Model Pemrosesan Informasi Manusia

Model pemrosesan informasi manusia menggambarkan bagaimana informasi diterima oleh indera manusia, diproses oleh sistem kognitif, dan menghasilkan tindakan tertentu. Model ini dikembangkan untuk memahami mekanisme kerja mental manusia dalam menyelesaikan tugas, memecahkan masalah, serta mengambil keputusan dalam lingkungan kerja modern (Harris & Li, 2023).

Secara umum, model *Human Information Processing* terdiri dari tiga komponen utama yaitu sistem sensorik, sistem pemrosesan pusat, dan sistem respons motorik. Tahap pertama dimulai dari penerimaan informasi melalui indera manusia seperti mata, telinga, dan kulit.

Informasi yang diterima dari lingkungan kemudian dikirim ke otak untuk diproses lebih lanjut (Ng *et al.*, 2024).

Tahap kedua merupakan proses pengolahan informasi di dalam otak atau sistem pemrosesan pusat. Pada tahap ini manusia melakukan interpretasi terhadap informasi berdasarkan pengalaman, pengetahuan, perhatian, dan memori yang dimiliki. Proses tersebut melibatkan persepsi, analisis situasi, pengambilan keputusan, hingga pemecahan masalah (Bellandi *et al.*, 2023).

Tahap terakhir adalah respons atau *output*. Setelah informasi diproses, manusia menghasilkan tindakan tertentu melalui sistem motorik seperti gerakan tangan, ucapan, maupun tindakan fisik lainnya. Kecepatan dan ketepatan respons dipengaruhi oleh tingkat kompleksitas tugas serta kemampuan individu dalam memahami informasi (Das *et al.*, 2025).

Beberapa model modern juga menambahkan komponen memori sensorik, memori jangka pendek, dan memori jangka panjang dalam proses pemrosesan informasi manusia. Informasi yang diterima tidak semuanya disimpan secara permanen, melainkan diseleksi berdasarkan tingkat perhatian dan relevansi terhadap tugas yang sedang dilakukan.

Dalam ergonomika, model pemrosesan informasi manusia digunakan sebagai dasar dalam merancang sistem kerja dan antarmuka teknologi yang sesuai dengan kemampuan manusia. Pemahaman terhadap model ini membantu mengurangi beban mental pekerja, meningkatkan keselamatan kerja, dan meminimalkan terjadinya *human error*.

5.2.3 Tahapan Input, Process, dan Output

Konsep dasar *Human Information Processing* sering dijelaskan melalui tahapan *input*, *process*, dan *output*. Ketiga tahapan tersebut menggambarkan alur bagaimana manusia menerima stimulus dari lingkungan, mengolah informasi tersebut, dan menghasilkan respons tertentu (Harris & Li, 2023).

Tahap pertama adalah *input*, yaitu proses penerimaan informasi melalui sistem sensorik manusia. Informasi dari lingkungan dapat berupa cahaya, suara, suhu, warna, simbol, maupun sinyal tertentu. Kualitas penerimaan informasi dipengaruhi oleh kemampuan indera manusia serta kondisi lingkungan kerja. Sebagai contoh, pencahayaan yang buruk dapat mengurangi kemampuan pekerja dalam membaca informasi visual sehingga meningkatkan risiko kesalahan kerja (Ng *et al.*, 2024).

Tahap kedua adalah *process* atau pengolahan informasi. Pada tahap ini, informasi yang diterima akan diproses di dalam otak melalui proses persepsi, perhatian, memori, dan pengambilan keputusan. Faktor pengalaman, tingkat konsentrasi, kondisi emosional, serta beban kerja mental sangat memengaruhi kualitas pengolahan informasi manusia (Bellandi *et al.*, 2023).

Perhatian (*attention*) menjadi bagian penting dalam proses pengolahan informasi karena manusia memiliki keterbatasan kapasitas kognitif. Jika terlalu banyak informasi diterima dalam waktu bersamaan, maka dapat terjadi *information overload* yang menyebabkan penurunan performa kerja dan meningkatnya kemungkinan *human error* (Das *et al.*, 2025).

Tahap terakhir adalah *output* atau respons. Setelah informasi diproses, manusia menghasilkan tindakan tertentu

melalui sistem motorik. Respons dapat berupa gerakan fisik, komunikasi verbal, maupun pengambilan keputusan operasional. Kecepatan dan ketepatan respons sangat dipengaruhi oleh kompleksitas tugas dan kemampuan individu dalam memproses informasi (Wasi & Islam, 2024).

Dalam ergonomika, pemahaman terhadap tahapan *input*, *process*, dan *output* sangat penting untuk menciptakan sistem kerja yang sesuai dengan kemampuan manusia. Sistem yang ergonomis harus mampu mendukung penerimaan informasi yang jelas, proses pengolahan informasi yang mudah, serta respons kerja yang efektif sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan produktivitas kerja (Zhu *et al.*, 2024).

5.2.4 Karakteristik Pemrosesan Informasi pada Manusia

Pemrosesan informasi pada manusia memiliki karakteristik yang berbeda dengan mesin atau komputer. Manusia memiliki kemampuan berpikir fleksibel, belajar dari pengalaman, dan beradaptasi terhadap situasi baru. Namun, manusia juga memiliki keterbatasan fisik dan kognitif yang memengaruhi kemampuan dalam menerima dan mengolah informasi (Das *et al.*, 2025).

Salah satu karakteristik utama pemrosesan informasi manusia adalah keterbatasan kapasitas perhatian. Manusia tidak mampu memproses seluruh informasi secara bersamaan sehingga otak akan melakukan seleksi terhadap informasi yang dianggap paling penting. Kondisi lingkungan kerja yang terlalu kompleks dapat menyebabkan gangguan konsentrasi dan meningkatkan beban mental pekerja (Bellandi *et al.*, 2023).

Karakteristik berikutnya adalah kemampuan adaptasi dan pembelajaran. Manusia mampu meningkatkan performa kerja melalui pengalaman dan latihan. Semakin sering seseorang melakukan suatu pekerjaan, maka proses pemrosesan informasi menjadi lebih cepat dan efisien. Kemampuan ini dikenal sebagai otomatisasi kognitif, yaitu kemampuan melakukan tugas tanpa memerlukan perhatian penuh (Ng *et al.*, 2024).

Selain itu, pemrosesan informasi manusia juga dipengaruhi oleh faktor emosional dan psikologis. Kondisi stres, tekanan kerja, kelelahan, dan motivasi dapat memengaruhi kualitas pengambilan keputusan dan respons kerja seseorang. Tekanan mental yang tinggi dapat menyebabkan kesalahan persepsi maupun keterlambatan respons dalam bekerja (Harris & Li, 2023).

Karakteristik lainnya adalah keterbatasan memori jangka pendek. Manusia hanya mampu menyimpan sejumlah kecil informasi dalam waktu singkat. Jika informasi terlalu kompleks atau terlalu banyak, maka sebagian informasi dapat terlupakan. Oleh sebab itu, desain sistem kerja harus memperhatikan kesederhanaan dan kejelasan informasi agar mudah dipahami pengguna (Wasi & Islam, 2024).

Di sisi lain, manusia memiliki kemampuan kreatif dan pemecahan masalah yang lebih baik dibandingkan mesin. Manusia dapat menggunakan pengalaman, intuisi, dan pertimbangan situasional dalam mengambil keputusan. Kemampuan tersebut menjadikan manusia tetap memiliki peran penting dalam sistem kerja modern meskipun teknologi otomatisasi terus berkembang (Zhu *et al.*, 2024).

Dengan memahami karakteristik pemrosesan informasi manusia, ergonomika dapat membantu merancang sistem

kerja yang sesuai dengan kemampuan dan keterbatasan manusia. Pendekatan ini bertujuan menciptakan interaksi kerja yang lebih aman, nyaman, efektif, dan efisien (Das *et al.*, 2025).

5.3 Penerapan *Human Information Processing*

5.3.1 Penerapan pada Industri Manufaktur

Penerapan *Human Information Processing* (HIP) pada industri manufaktur bertujuan untuk meningkatkan efisiensi kerja, keselamatan operator, serta kualitas produksi. Dalam lingkungan manufaktur modern, pekerja harus mampu menerima dan memproses berbagai informasi secara cepat, seperti indikator mesin, alarm sistem, instruksi kerja, dan data produksi secara *real-time*.

Menurut Ng *et al.* (2024), pemahaman mengenai kemampuan kognitif manusia sangat penting dalam perancangan sistem kerja industri karena pekerja harus mampu berinteraksi dengan berbagai teknologi dan sistem otomatisasi secara bersamaan. Salah satu penerapan HIP dalam industri manufaktur adalah desain antarmuka mesin yang ergonomis. Tampilan kontrol, warna indikator, ukuran teks, dan tata letak tombol harus dirancang agar mudah dipahami oleh operator.

Sistem yang terlalu kompleks dapat meningkatkan beban kerja mental dan risiko *human error*. Dengan pendekatan ergonomika kognitif, perusahaan dapat menciptakan sistem kontrol yang lebih intuitif sehingga operator mampu mengambil keputusan dengan cepat dan tepat. Bellandi *et al.* (2023) menjelaskan bahwa penyederhanaan informasi visual dapat membantu

mengurangi stres kerja dan meningkatkan konsentrasi operator di lingkungan produksi.

Selain itu, HIP juga diterapkan dalam sistem otomatisasi industri dan *smart manufacturing*. Operator modern tidak hanya bekerja secara manual, tetapi juga berinteraksi dengan robot industri, sensor pintar, serta dashboard digital berbasis data. Dalam kondisi tersebut, pekerja harus mampu melakukan monitoring informasi secara terus-menerus sehingga diperlukan desain sistem yang mendukung perhatian dan konsentrasi pengguna.

5.3.2 Penerapan pada Transportasi

Dalam bidang transportasi, *Human Information Processing* memiliki peran penting dalam mendukung keselamatan dan efektivitas operasional. Pengemudi kendaraan, pilot, operator kereta, maupun pengendali lalu lintas harus mampu menerima dan memproses informasi secara cepat untuk menghindari kecelakaan dan memastikan kelancaran sistem transportasi.

Penerapan HIP pada transportasi dapat dilihat pada desain dashboard kendaraan dan sistem navigasi modern. Informasi seperti kecepatan, arah, kondisi lalu lintas, dan peringatan keselamatan harus disajikan secara sederhana dan mudah dipahami. Jika terlalu banyak informasi ditampilkan dalam waktu bersamaan, maka dapat menyebabkan *information overload* yang mengganggu konsentrasi pengemudi.

Harris dan Li (2023) menjelaskan bahwa desain sistem transportasi modern harus mempertimbangkan keterbatasan perhatian dan kapasitas memori manusia. Dalam dunia penerbangan, konsep HIP digunakan untuk merancang kokpit

pesawat yang ergonomis sehingga pilot mampu memproses berbagai informasi penerbangan secara efektif.

Pada sistem transportasi modern, teknologi otomatisasi seperti *Advanced Driver Assistance System* (ADAS) juga memanfaatkan konsep HIP. Sistem ini membantu pengemudi dalam mendeteksi bahaya, memberikan peringatan dini, dan mendukung pengambilan keputusan selama berkendara. Namun, interaksi antara manusia dan sistem otomatis tetap harus dirancang secara ergonomis agar tidak menimbulkan kebingungan pengguna (Das *et al.*, 2025).

5.3.3 Penerapan pada Bidang Kesehatan

Bidang kesehatan merupakan salah satu sektor yang sangat membutuhkan penerapan *Human Information Processing* karena tenaga medis bekerja dalam lingkungan dengan tingkat kompleksitas dan tekanan tinggi. Dokter, perawat, dan tenaga kesehatan lainnya harus mampu menerima, memahami, serta mengambil keputusan berdasarkan informasi pasien secara cepat dan akurat.

Penerapan HIP pada bidang kesehatan terlihat pada desain sistem informasi rumah sakit dan perangkat medis. Tampilan data pasien, hasil pemeriksaan, alarm alat kesehatan, dan sistem monitoring harus dirancang agar mudah dipahami oleh tenaga medis. Kesalahan dalam membaca atau memahami informasi dapat berdampak langsung terhadap keselamatan pasien.

Menurut Bellandi *et al.* (2023), beban kerja mental yang tinggi pada tenaga kesehatan dapat meningkatkan risiko *medical error*. Oleh karena itu, ergonomika kognitif diterapkan untuk menyederhanakan alur informasi,

memperbaiki desain antarmuka perangkat medis, dan meningkatkan komunikasi antar tenaga medis.

Perkembangan teknologi kesehatan digital seperti *telemedicine*, rekam medis elektronik, dan sistem diagnosis berbasis AI juga meningkatkan kebutuhan terhadap pemahaman HIP. Sistem digital harus dirancang agar mendukung pengambilan keputusan tenaga kesehatan tanpa menambah beban kognitif pengguna. Hal ini diperkuat oleh Zhu *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa teknologi kesehatan modern perlu dikembangkan dengan pendekatan *human-centered* agar lebih aman dan mudah digunakan.

5.3.4 Penerapan pada Sistem Informasi dan Teknologi

Perkembangan sistem informasi dan teknologi digital menjadikan *Human Information Processing* sebagai bagian penting dalam desain teknologi modern. Pengguna sistem informasi harus mampu memahami informasi yang disajikan melalui antarmuka digital seperti aplikasi, website, dashboard, maupun perangkat lunak lainnya.

Salah satu penerapan HIP adalah pada desain *user interface* (UI) dan *user experience* (UX). Sistem digital harus dirancang dengan tampilan sederhana, navigasi yang jelas, dan penyajian informasi yang mudah dipahami pengguna. Desain yang terlalu rumit dapat meningkatkan kebingungan dan menurunkan efektivitas penggunaan sistem.

Das *et al.* (2025) menjelaskan bahwa sistem digital modern harus mampu mendukung kemampuan manusia dalam memproses informasi secara cepat dan efisien. Selain itu, HIP juga diterapkan pada sistem keamanan informasi. Pengguna harus mampu memahami notifikasi keamanan,

otentikasi sistem, dan prosedur penggunaan teknologi dengan baik agar dapat meminimalkan kesalahan operasional maupun risiko keamanan data.

Pada era transformasi digital, sistem berbasis AI dan otomatisasi juga membutuhkan pendekatan ergonomika kognitif. Teknologi modern harus dirancang untuk mendukung kemampuan manusia, bukan menggantikan sepenuhnya peran manusia. Oleh sebab itu, interaksi manusia dan teknologi harus mempertimbangkan aspek kenyamanan, perhatian, dan kapasitas kognitif pengguna (Ng *et al.*, 2024).

5.4 Teknologi Modern dan *Human Information Processing*

5.4.1 *Artificial Intelligence* dalam Ergonomika

Artificial Intelligence (AI) merupakan teknologi yang memungkinkan sistem komputer melakukan tugas yang menyerupai kemampuan manusia seperti analisis data, pengambilan keputusan, dan pengenalan pola. Dalam ergonomika, AI digunakan untuk membantu manusia dalam memproses informasi secara lebih cepat dan akurat.

AI dapat diterapkan pada sistem monitoring kerja, analisis perilaku operator, serta prediksi risiko kecelakaan kerja. Teknologi ini membantu mengurangi beban mental pekerja dengan menyediakan rekomendasi otomatis dan informasi yang lebih terstruktur.

Menurut Wasi dan Islam (2024), penggunaan AI dalam ergonomika harus tetap mempertimbangkan kemampuan kognitif manusia agar pengguna tidak mengalami

kebingungan dalam mengoperasikan sistem. Jika sistem AI terlalu kompleks atau sulit dipahami, maka pengguna dapat kehilangan kontrol terhadap proses kerja yang dijalankan.

5.4.2 *Internet of Things* dan *Smart Workplace*

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan berbagai perangkat melalui jaringan internet sehingga dapat saling bertukar data secara otomatis. Dalam lingkungan kerja modern, IoT digunakan untuk menciptakan *smart workplace* yang lebih efisien dan adaptif terhadap kebutuhan pengguna.

Penerapan IoT memungkinkan pekerja memperoleh informasi secara *real-time* melalui sensor pintar, perangkat *wearable*, dan dashboard digital. Sistem ini membantu meningkatkan pengawasan kondisi kerja, keselamatan, dan efisiensi operasional.

Bellandi *et al.* (2023) menjelaskan bahwa meningkatnya jumlah informasi dari perangkat IoT dapat menyebabkan *information overload* apabila sistem tidak dirancang secara ergonomis. Oleh sebab itu, informasi yang disajikan harus tetap sederhana, relevan, dan mudah dipahami oleh pengguna.

5.4.3 *Virtual Reality* dan *Augmented Reality*

Virtual Reality (VR) dan *Augmented Reality* (AR) merupakan teknologi yang banyak digunakan dalam pelatihan kerja, simulasi industri, pendidikan, dan desain sistem kerja modern. Teknologi ini memungkinkan pengguna berinteraksi dengan lingkungan virtual maupun informasi digital secara lebih interaktif. Dalam ergonomika, VR digunakan untuk simulasi lingkungan kerja dan pelatihan operator tanpa risiko

bahaya nyata. Sementara itu, AR membantu pengguna dengan menampilkan informasi digital secara langsung pada lingkungan kerja nyata sehingga mempercepat proses pemahaman informasi. Harris dan Li (2023) menyatakan bahwa penggunaan VR dan AR mampu meningkatkan efektivitas pembelajaran dan pengambilan keputusan dalam lingkungan kerja modern. Namun, penggunaan teknologi ini juga dapat menimbulkan kelelahan visual, disorientasi, dan beban kognitif berlebih apabila desain sistem tidak memperhatikan kemampuan manusia.

5.4.4 Tantangan *Human Information Processing* di Era Industri 5.0

Era Industri 5.0 menekankan kolaborasi antara manusia dan teknologi cerdas dalam menciptakan sistem kerja yang lebih *human-centered*. Pada era ini, manusia tidak hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga mitra kolaboratif dengan sistem AI, robotika, dan otomatisasi cerdas.

Salah satu tantangan utama HIP di era Industri 5.0 adalah meningkatnya kompleksitas informasi yang harus diproses manusia. Pekerja dituntut mampu memahami data secara cepat, melakukan *multitasking*, dan beradaptasi dengan teknologi baru secara terus-menerus.

Menurut Das *et al.* (2025), perkembangan teknologi yang sangat cepat dapat meningkatkan beban kerja mental serta risiko *digital fatigue* pada pekerja modern. Jika tidak dikelola dengan baik, kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas pengambilan keputusan manusia dan meningkatkan risiko kesalahan kerja.

Oleh karena itu, pendekatan ergonomika kognitif menjadi sangat penting dalam menghadapi era Industri 5.0. Sistem kerja masa depan harus dirancang dengan mempertimbangkan kemampuan, keterbatasan, dan kesejahteraan manusia agar tercipta interaksi yang harmonis antara manusia dan teknologi modern (Zhu *et al.*, 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Bridger, R. S. (2018). *Introduction to Human Factors and Ergonomics*. CRC Press.
- Grandjean, E., & Kroemer, K. H. E. (2009). *Fitting the Task to the Human: A Textbook of Occupational Ergonomics*. CRC Press.
- Helander, M. (2006). *A Guide to Human Factors and Ergonomics*. CRC Press.
- Kroemer, K. H. E., & Kroemer, H. B. (2017). *Ergonomics: How to Design for Ease and Efficiency*. Pearson.
- Norman, D. A. (2013). *The Design of Everyday Things*. Basic Books.
- Salvendy, G. (2012). *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. John Wiley & Sons.
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y., & Gordon-Becker, S. (2021). *An Introduction to Human Factors Engineering*. Pearson.
- Wilson, J. R., & Corlett, E. N. (2005). *Evaluation of Human Work*. CRC Press.
- Bellandi, T., Albolino, S., & Bilancini, E. (2023). *Ergonomics and Nudging for Health, Safety and Happiness: Results of SIE 2022*. Springer.
- Das, S., Akram, W., Khanzode, V., & Iqbal, R. (2025). *Human-Centered Digitalization, Volume 1: Proceedings of 4th ACED, HWWE-2023 and BRICSplus HFE 2023*. Springer.
- Harris, D., & Li, W.-C. (2023). *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 20th International Conference, EPCE 2023*. Springer.

- Ng, Y. G., Daruis, D. D. I., & Abdul Wahat, N. W. (2024). *Human Factors and Ergonomics Toward an Inclusive and Sustainable Future: HFEM 2023*. Springer.
- Wasi, A. T., & Islam, M. R. (2024). "CogErgLLM: Exploring Large Language Model Systems Design Perspective Using Cognitive Ergonomics." *arXiv Preprint arXiv:2407.02885*.
- Zhu, J., Fan, L., Su, H., & Sun, Z. (2024). "A New Era in Human Factors Engineering: A Survey of the Applications and Prospects of Large Multimodal Models." *arXiv Preprint arXiv:2405.13426*.
- Bellandi, T., Albolino, S., & Bilancini, E. (2023). *Ergonomics and Nudging for Health, Safety and Happiness: Results of SIE 2022*. Cham: Springer.
- Das, S., Akram, W., Khanzode, V., & Iqbal, R. (2025). *Human-Centered Digitalization: Proceedings of 4th ACED, HWWE-2023 and BRICSplus HFE 2023*. Singapore: Springer.
- Harris, D., & Li, W.-C. (2023). *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 20th International Conference, EPCE 2023*. Cham: Springer.
- Ng, Y. G., Daruis, D. D. I., & Abdul Wahat, N. W. (2024). *Human Factors and Ergonomics Toward an Inclusive and Sustainable Future: HFEM 2023*. Singapore: Springer.
- Wasi, A. T., & Islam, M. R. (2024). "CogErgLLM: Exploring Large Language Model Systems Design Perspective Using Cognitive Ergonomics." *arXiv Preprint*, arXiv:2407.02885.
- Zhu, J., Fan, L., Su, H., & Sun, Z. (2024). "A New Era in Human Factors Engineering: A Survey of the Applications and Prospects of Large Multimodal Models." *arXiv Preprint*, arXiv:2405.13426.

BAB 6

BEBAN KERJA MENTAL DAN PENGUKURAN KOGNITIF

Oleh Lukman Handoko

Beban kerja mental atau *cognitive workload* merupakan konsep penting dalam kajian interaksi manusia dan sistem teknologi, khususnya dalam bidang *human-computer interaction* (HCI). Secara umum, beban kerja mental merujuk pada jumlah sumber daya kognitif yang dibutuhkan individu untuk menyelesaikan suatu tugas tertentu. Dalam konteks interaksi manusia dengan sistem digital, pemahaman mengenai beban kerja mental menjadi krusial karena kompleksitas sistem informasi, antarmuka digital, serta lingkungan kerja modern semakin menuntut kapasitas kognitif pengguna. Oleh karena itu, pengukuran yang akurat terhadap beban kerja mental menjadi prasyarat penting untuk memahami bagaimana manusia memproses informasi, mengalokasikan perhatian, serta mempertahankan performa ketika berinteraksi dengan sistem teknologi. Literatur menunjukkan bahwa pengukuran beban kerja mental dalam HCI umumnya memanfaatkan kombinasi antara indikator fisiologis objektif, metrik kinerja tugas, serta skala subjektif yang merepresentasikan persepsi individu terhadap tuntutan kognitif suatu tugas. Pendekatan multidimensional ini diperlukan karena tidak ada satu metode pengukuran yang

secara universal paling unggul di seluruh konteks penggunaan. Sebaliknya, pengukuran yang reliabel biasanya dilakukan melalui triangulasi berbagai metode untuk menangkap aspek yang berbeda dari beban kerja mental, seperti respons fisiologis, performa tugas, serta persepsi subjektif terhadap usaha kognitif (Devos *et al.*, 2020; Fitzgibbon-Collins *et al.*, 2025; Jiang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025; Shanbhag *et al.*, 2025)

Dalam literatur HCI modern, berbagai metode telah dikembangkan untuk mengukur beban kerja mental secara objektif maupun subjektif. Salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan adalah pengukuran berbasis respons fisiologis. Metode ini memanfaatkan perubahan fisiologis yang terjadi ketika individu menghadapi peningkatan tuntutan kognitif. Di antara berbagai indikator fisiologis yang tersedia, *pupillometry* atau pengukuran diameter pupil telah lama dikenal sebagai indikator sensitif terhadap usaha mental. Perubahan ukuran pupil terbukti berkorelasi dengan tingkat beban kognitif dalam berbagai konteks tugas, termasuk simulasi mengemudi dan tugas medis (Devos *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025). Salah satu indeks yang dikembangkan dari pendekatan ini adalah *Index of Cognitive Activity* (ICA) yang dihitung dari fluktuasi mikro pada diameter pupil. ICA menunjukkan reliabilitas yang baik dan validitas konvergen dengan indikator neurofisiologis lain seperti *event-related potentials* (ERP). Penelitian pada populasi lanjut usia dan kelompok klinis menunjukkan bahwa ICA memiliki tingkat reliabilitas moderat hingga tinggi (ICC 0.56–0.73) serta berkorelasi dengan komponen ERP yang berkaitan dengan proses perhatian dan pemrosesan

informasi, sehingga mendukung penggunaannya sebagai indikator objektif beban kerja mental (Devos *et al.*, 2020)

Selain *pupillometry*, *eye-tracking* juga menjadi metode yang sangat penting dalam mengukur beban kerja kognitif dalam studi HCI. Teknologi ini memungkinkan peneliti untuk memantau berbagai parameter gerakan mata, seperti jumlah fiksasi, durasi fiksasi, pola tatapan (*gaze patterns*), serta perubahan diameter pupil selama interaksi dengan sistem digital. Literatur menunjukkan bahwa perubahan dalam metrik-metrik tersebut sering kali berkorelasi dengan peningkatan tuntutan kognitif pada pengguna. Misalnya, peningkatan durasi fiksasi dan perubahan pola tatapan dapat menunjukkan peningkatan kebutuhan pemrosesan informasi ketika pengguna berinteraksi dengan antarmuka yang kompleks (Devos *et al.*, 2020; Fitzgibbon-Collins *et al.*, 2025; Kahya *et al.*, 2018; Kleiman & Galvin, 2024; Zhang *et al.*, 2024). Namun demikian, penggunaan *eye-tracking* juga memiliki beberapa keterbatasan metodologis. Faktor lingkungan seperti pencahayaan, pergerakan kepala, serta kondisi mata pengguna dapat memengaruhi akurasi pengukuran. Oleh karena itu, beberapa studi merekomendasikan penggunaan metode ini bersama dengan ukuran lain seperti NASA-TLX atau indikator neurofisiologis untuk meningkatkan reliabilitas interpretasi beban kerja mental (Devos *et al.*, 2020; Fitzgibbon-Collins *et al.*, 2025; Kleiman & Galvin, 2024; Zhang *et al.*, 2024)

Pendekatan lain yang juga banyak digunakan dalam penelitian beban kerja mental adalah pengukuran berbasis aktivitas otak. *Electroencephalography* (EEG) merupakan salah satu metode neurofisiologis yang memungkinkan peneliti mengamati aktivitas listrik otak secara langsung

selama individu melakukan suatu tugas. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa fitur EEG, seperti kekuatan spektral pada pita frekuensi tertentu maupun komponen ERP, dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat beban kerja kognitif. Bahkan dalam beberapa penelitian terbaru, penggunaan single-channel EEG telah menunjukkan potensi sebagai metode yang lebih praktis untuk pengukuran beban kerja mental dalam konteks aplikasi bergerak atau lingkungan kerja nyata (Gramouseni *et al.*, 2023; Molcho *et al.*, 2022). Analisis EEG multivariat juga mampu mengungkap hubungan antara aktivitas otak dan kinerja tugas yang bergantung pada tingkat beban kognitif, baik pada populasi muda maupun lanjut usia González *et al.*, 2024. Meskipun demikian, penggunaan EEG memerlukan proses pra-pemrosesan yang kompleks serta rentan terhadap artefak gerakan, sehingga penerapannya di lingkungan nyata sering kali memerlukan desain eksperimen yang hati-hati (Molcho *et al.*, 2022).

Selain EEG, metode *functional near-infrared spectroscopy* (fNIRS) juga semakin banyak digunakan dalam penelitian HCI untuk mengukur aktivitas kortikal yang berkaitan dengan beban kerja kognitif. Teknologi ini mengukur perubahan oksigenasi darah di korteks otak yang mencerminkan aktivitas neural selama individu melakukan tugas tertentu. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja mental sering kali berkorelasi dengan peningkatan aktivasi pada area prefrontal cortex, terutama dalam tugas yang melibatkan pengambilan keputusan, perhatian berkelanjutan, dan kontrol eksekutif (González *et al.*, 2024). Dalam beberapa studi yang menggunakan teknologi realitas virtual atau augmented reality, kombinasi EEG dan fNIRS telah digunakan untuk mengidentifikasi hubungan

antara tuntutan tugas, aktivitas otak, dan performa pengguna (Fitzgibbon-Collins *et al.*, 2025; Gramouseni *et al.*, 2023). Meskipun demikian, fNIRS memiliki keterbatasan dalam hal kedalaman pengukuran karena hanya mampu mendeteksi aktivitas pada permukaan korteks, serta dapat dipengaruhi oleh artefak gerakan dalam konteks penggunaan dunia nyata (González *et al.*, 2024).

Di samping pengukuran fisiologis, pendekatan subjektif juga memainkan peran penting dalam penelitian beban kerja mental. Salah satu instrumen yang paling banyak digunakan adalah *NASA Task Load Index* (NASA-TLX). Instrumen ini mengukur persepsi individu terhadap beban kerja melalui enam dimensi utama, yaitu tuntutan mental, tuntutan fisik, tuntutan temporal, usaha, performa, dan tingkat frustrasi. NASA-TLX telah digunakan secara luas dalam berbagai studi HCI dan terbukti memiliki reliabilitas yang baik dalam mengukur persepsi beban kerja pengguna. Penelitian menunjukkan bahwa instrumen ini memiliki reliabilitas uji ulang yang baik hingga sangat baik (ICC 0.71–0.81), terutama dalam konteks tugas kognitif yang dilakukan secara berulang (Devos *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025). Meskipun demikian, karena sifatnya yang subjektif dan retrospektif, hasil pengukuran NASA-TLX dapat dipengaruhi oleh faktor psikologis seperti suasana hati atau bias persepsi. Oleh karena itu, penggunaan instrumen ini sering kali dipadukan dengan indikator objektif untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai beban kerja mental (Devos *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2025). Selain ukuran fisiologis dan subjektif, metrik kinerja tugas juga menjadi indikator penting dalam penelitian beban kerja mental. Parameter seperti tingkat akurasi, waktu reaksi, serta tingkat kesalahan sering

digunakan untuk menilai bagaimana tuntutan kognitif memengaruhi performa individu dalam menyelesaikan tugas tertentu. Secara umum, literatur menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja kognitif cenderung menurunkan performa tugas, misalnya melalui peningkatan waktu reaksi atau penurunan tingkat akurasi (Ahmadnezhad *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2023; Saeed *et al.*, 2025). Namun demikian, dalam beberapa situasi performa tugas dapat tetap stabil meskipun beban kerja meningkat, karena individu menggunakan strategi kompensasi atau mengubah prioritas antara kecepatan dan akurasi. Fenomena ini menunjukkan bahwa pengukuran performa saja tidak selalu cukup untuk merepresentasikan tingkat beban kerja mental secara akurat (Jiang *et al.*, 2023).

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa pendekatan yang paling reliabel dalam mengukur beban kerja mental adalah pendekatan multimodal yang mengintegrasikan berbagai jenis indikator. Kombinasi antara indikator fisiologis seperti pupillometry, eye-tracking, EEG, dan fNIRS dengan ukuran subjektif seperti NASA-TLX serta metrik performa tugas memungkinkan peneliti memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika beban kerja kognitif dalam interaksi manusia dengan sistem teknologi (Devos *et al.*, 2020; Gramouseni *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025). Pendekatan konvergen ini juga membantu mengatasi keterbatasan masing-masing metode serta meningkatkan validitas interpretasi hasil penelitian.

Dengan demikian, kajian mengenai pengukuran beban kerja mental tidak hanya penting untuk memahami mekanisme kognitif yang mendasari interaksi manusia dengan teknologi, tetapi juga memiliki implikasi praktis yang

signifikan bagi desain sistem yang lebih adaptif dan ramah pengguna. Dalam konteks HCI, pemahaman yang lebih baik mengenai dinamika beban kerja mental dapat membantu perancang sistem mengembangkan antarmuka yang mampu menyesuaikan kompleksitas informasi, ritme interaksi, serta dukungan kognitif yang diberikan kepada pengguna. Oleh karena itu, penelitian mengenai metode pengukuran beban kerja mental dan hubungannya dengan performa tugas tetap menjadi agenda penting dalam pengembangan sistem interaktif yang efektif, efisien, dan berpusat pada manusia.

6.1 Konsep Teoretis Beban Kerja Mental

Beban kerja mental (*mental workload*) merupakan konsep penting dalam kajian ergonomi, psikologi kognitif, dan *human factors* yang menjelaskan bagaimana individu menggunakan sumber daya kognitif untuk menyelesaikan suatu tugas. Secara umum, beban kerja mental dipahami sebagai distribusi sumber daya mental yang diperlukan untuk memproses informasi, mempertahankan perhatian, dan mengoordinasikan tindakan selama pelaksanaan tugas tertentu. Konsep ini menjadi semakin relevan dalam lingkungan kerja modern yang ditandai oleh kompleksitas sistem teknologi, tingginya tuntutan informasi, serta meningkatnya interaksi manusia dengan sistem digital. Dalam konteks tersebut, kinerja individu tidak hanya ditentukan oleh kemampuan teknis, tetapi juga oleh kapasitas kognitif yang tersedia untuk menghadapi tuntutan tugas yang kompleks.

6.1.1 Definisi Beban Kerja Mental

Dalam perspektif ergonomi dan *human factors*, beban kerja mental dipahami sebagai jumlah sumber daya kognitif yang diperlukan individu untuk melaksanakan suatu tugas dalam kondisi tertentu. Konsep ini menekankan hubungan antara tuntutan tugas, kapasitas kognitif individu, serta kondisi lingkungan kerja. Dalam kerangka ergonomi, beban kerja mental sering dioperasionalkan melalui kombinasi indikator subjektif, indikator kinerja, dan indikator fisiologis. Pendekatan multimodal ini dianggap penting untuk mengurangi bias yang mungkin muncul jika hanya menggunakan satu jenis pengukuran saja (Bartolo, 2026; Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Gogna *et al.*, 2023; Ranchet *et al.*, 2017)

Dalam praktik ergonomi, beban kerja mental juga dipandang sebagai variabel desain yang dapat dioptimalkan melalui perancangan sistem kerja yang tepat. Desain antarmuka, pengaturan alur kerja, serta pengaturan tempo tugas dapat disesuaikan untuk menjaga tingkat beban kerja mental pada level yang optimal. Tujuannya adalah memastikan bahwa operator memiliki cukup sumber daya kognitif untuk mempertahankan performa tanpa mengalami overload kognitif yang dapat menyebabkan kesalahan operasional (Bartolo, 2026; Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Ranchet *et al.*, 2017).

Dalam psikologi kognitif, beban kerja mental dikaitkan dengan keterbatasan kapasitas sistem pemrosesan informasi manusia. Perspektif ini menekankan bahwa manusia memiliki kapasitas terbatas dalam memori kerja, perhatian, serta fungsi eksekutif yang berperan dalam pengambilan keputusan

dan pengendalian tindakan. Ketika tuntutan tugas meningkat, individu harus mengalokasikan sumber daya kognitif secara selektif untuk memproses informasi yang relevan dengan tujuan tugas.

Dalam kerangka ini, teori *Cognitive Load Theory* (CLT) menjelaskan bahwa beban kognitif terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu *intrinsic load*, *extraneous load*, dan *germane load*. *Intrinsic load* berkaitan dengan kompleksitas inheren dari materi atau tugas yang harus diproses, sedangkan *extraneous load* berkaitan dengan cara penyajian informasi yang dapat meningkatkan atau mengurangi tuntutan kognitif secara tidak perlu. Sementara itu, *germane load* berkaitan dengan usaha mental yang digunakan untuk membangun skema pengetahuan baru. Dengan demikian, beban kerja mental tidak hanya dipandang sebagai hambatan kinerja, tetapi juga sebagai faktor yang dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan proses pembelajaran dan desain tugas (Ahmadnezhad *et al.*, 2023; Kalyuga, 2006; Satheesan, 2025).

6.1.2 Teori Beban Kerja Mental

Salah satu pendekatan teoretis utama dalam menjelaskan beban kerja mental adalah teori kapasitas (*capacity-sharing theory*). Teori ini menyatakan bahwa manusia memiliki sumber daya kognitif yang terbatas yang harus dibagi di antara berbagai tugas yang sedang dilakukan. Ketika jumlah tuntutan tugas meningkat atau ketika individu harus beralih dengan cepat antara beberapa tugas, kapasitas kognitif dapat terlampaui sehingga kinerja menurun (Chambers & Whitmore, 1991; Nishida *et al.*, 2024; Ranchet *et al.*, 2017).

Pendekatan ini sering diuji melalui paradigma *dual-task*, di mana individu diminta melakukan dua tugas secara bersamaan. Penurunan kinerja yang terjadi dalam kondisi ini dikenal sebagai *dual-task cost*, yang mencerminkan keterbatasan sumber daya kognitif yang tersedia untuk memproses beberapa aktivitas secara simultan.

Selain teori kapasitas, *Cognitive Load Theory* memberikan kerangka konseptual yang menjelaskan bagaimana struktur tugas dan desain informasi memengaruhi penggunaan sumber daya kognitif. Teori ini membedakan antara beban kognitif intrinsik yang berasal dari kompleksitas materi dan beban kognitif ekstrinsik yang muncul akibat desain tugas atau antarmuka yang tidak efisien. Dengan mengurangi beban ekstrinsik melalui desain sistem yang lebih baik, kinerja dan pembelajaran dapat ditingkatkan tanpa harus mengurangi kompleksitas inti dari tugas tersebut (Ahmadnezhad *et al.*, 2023; Satheesan, 2025).

6.2 Pengukuran Kognitif

6.2.1 Definisi dan Operasionalisasi

Dalam penelitian tugas kompleks dan HCI, pengukuran kognitif didefinisikan sebagai proses evaluasi berbagai proses mental yang mendasari performa individu ketika menyelesaikan tugas yang menuntut pemrosesan informasi yang intensif. Proses tersebut mencakup perhatian, memori kerja, kecepatan pemrosesan informasi, fungsi eksekutif, serta pengambilan keputusan yang berkontribusi langsung terhadap keberhasilan pelaksanaan tugas (Devos *et al.*, 2023; Diedrich *et al.*, 2024).

Pengukuran kognitif dalam konteks ini tidak hanya bertujuan untuk menilai kemampuan mental secara umum, tetapi juga untuk mengidentifikasi bagaimana individu mengalokasikan sumber daya kognitif ketika menghadapi peningkatan kompleksitas tugas atau situasi multitugas. Oleh karena itu, banyak penelitian menggunakan desain eksperimen yang memanipulasi tingkat tuntutan kognitif melalui variasi kompleksitas tugas atau paradigma *dual-task* untuk mengamati perubahan performa kognitif individu. Perubahan tersebut dapat mengindikasikan keterbatasan kapasitas kognitif maupun strategi adaptasi yang digunakan individu untuk mempertahankan performa dalam kondisi beban kerja yang meningkat (Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Devos *et al.*, 2023; Gooderham *et al.*, 2020; Tomes *et al.*, 2025).

Secara operasional, pengukuran kognitif dalam penelitian tugas kompleks biasanya dilakukan melalui tiga pendekatan utama. Pendekatan pertama adalah penggunaan tugas kognitif spesifik domain, seperti tugas Stroop, Flanker, atau tugas berbasis waktu reaksi untuk mengukur perhatian dan kecepatan pemrosesan informasi. Tugas-tugas tersebut memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi kemampuan individu dalam memfokuskan perhatian dan memproses stimulus secara cepat dalam kondisi tuntutan kognitif tertentu (Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Devos *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2023).

6.2.2 Domain Fungsi Kognitif yang Diukur

Dalam penelitian mengenai performa kognitif, terdapat beberapa domain fungsi kognitif utama yang secara konsisten menjadi fokus pengukuran. Domain-domain tersebut mencerminkan berbagai proses mental yang mendasari

kemampuan individu dalam memproses informasi dan menyelesaikan tugas kompleks.

Domain pertama adalah perhatian dan kecepatan pemrosesan informasi. Perhatian berkaitan dengan kemampuan individu untuk memfokuskan sumber daya kognitif pada stimulus tertentu sambil mengabaikan stimulus yang tidak relevan. Kecepatan pemrosesan informasi sering diukur melalui tugas berbasis waktu reaksi yang menilai seberapa cepat individu dapat merespons stimulus yang diberikan. Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja mental sering menyebabkan penurunan perhatian berkelanjutan serta peningkatan waktu reaksi dalam berbagai tugas kognitif (Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Devos *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2023).

Domain kedua adalah memori kerja, yaitu kemampuan untuk menyimpan dan memanipulasi informasi secara sementara selama proses pemecahan masalah atau pengambilan keputusan. Memori kerja memainkan peran penting dalam berbagai aktivitas kognitif tingkat tinggi, termasuk perencanaan tindakan dan pengendalian perhatian. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tuntutan kognitif dapat mengurangi kapasitas memori kerja yang tersedia untuk tugas lain, sehingga menyebabkan penurunan performa dalam kondisi multitugas (Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Diedrich *et al.*, 2024; Thomas *et al.*, 2021).

Domain ketiga adalah fungsi eksekutif, yang mencakup kemampuan untuk mengontrol proses kognitif, menghambat respons yang tidak relevan, serta mengalihkan perhatian antar tugas. Fungsi eksekutif sering diukur melalui tugas yang menilai kemampuan inhibisi, fleksibilitas kognitif, dan

pembaruan informasi dalam memori kerja. Penelitian menunjukkan bahwa fungsi eksekutif memiliki peran penting dalam menentukan kemampuan individu untuk mengelola tuntutan multitugas dan mempertahankan performa dalam kondisi beban kerja tinggi (Beaulne-Séguin & Nantel, 2016; Devos *et al.*, 2020; Diedrich *et al.*, 2024; Gooderham *et al.*, 2020).

Domain keempat adalah pengambilan keputusan, yang berkaitan dengan kemampuan individu untuk mengintegrasikan berbagai informasi yang tersedia dan memilih tindakan yang paling sesuai dalam kondisi tertentu. Dalam banyak penelitian HCI, pengambilan keputusan sering diukur melalui tugas simulasi yang meniru situasi dunia nyata, seperti simulasi mengemudi atau skenario multitugas yang memerlukan evaluasi informasi secara cepat (Devos *et al.*, 2020; Tmes *et al.*, 2025).

6.3 Hubungan Pengukuran Kognitif dan Beban Kerja Mental

Hubungan antara pengukuran kognitif dan beban kerja mental merupakan salah satu topik utama dalam penelitian ergonomi kognitif. Beban kerja mental merujuk pada jumlah sumber daya kognitif yang diperlukan individu untuk menyelesaikan suatu tugas tertentu. Ketika tuntutan tugas meningkat, individu harus mengalokasikan lebih banyak sumber daya kognitif untuk mempertahankan performa, yang pada akhirnya dapat memengaruhi berbagai indikator performa kognitif.

Secara umum, peningkatan beban kerja mental cenderung menyebabkan penurunan performa pada berbagai domain kognitif. Misalnya, peningkatan beban kerja dapat mengurangi kemampuan perhatian berkelanjutan, meningkatkan tingkat kesalahan, serta memperlambat waktu reaksi dalam menyelesaikan tugas tertentu. Selain itu, kapasitas memori kerja yang tersedia untuk tugas tambahan juga cenderung berkurang ketika individu menghadapi tuntutan kognitif yang tinggi (Devos *et al.*, 2020; Diedrich *et al.*, 2024; Tomes *et al.*, 2025; Beaulne-Séguin & Nantel, 2016).

Namun demikian, hubungan antara beban kerja mental dan performa kognitif tidak selalu bersifat linear. Dalam beberapa situasi, individu yang memiliki pengalaman atau strategi kognitif yang efektif dapat mempertahankan performa meskipun menghadapi peningkatan beban kerja. Fenomena ini sering dijelaskan melalui konsep kompensasi kognitif, di mana individu merekrut sumber daya neural tambahan untuk mempertahankan performa dalam kondisi tuntutan tinggi (González *et al.*, 2024; Gramouseni *et al.*, 2023; Soussou *et al.*, 2012).

Selain itu, berbagai faktor seperti usia, kondisi kesehatan kognitif, serta tingkat cadangan kognitif (*cognitive reserve*) juga dapat memengaruhi hubungan antara beban kerja mental dan performa kognitif. Oleh karena itu, banyak penelitian merekomendasikan penggunaan pendekatan multimodal yang menggabungkan indikator performa, ukuran subjektif seperti NASA-TLX, serta indikator fisiologis untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika beban kerja kognitif dalam berbagai konteks tugas kompleks (Devos *et al.*, 2020; Neri *et al.*, 2025; Gooderham *et al.*, 2020).

6.4 Metode Pengukuran Beban Kerja Mental

Pengukuran beban kerja mental (*mental workload* atau *cognitive workload*) merupakan aspek penting dalam penelitian ergonomi kognitif, psikologi kerja, serta *human-computer interaction* (HCI). Beban kerja mental mengacu pada jumlah sumber daya kognitif yang diperlukan individu untuk menyelesaikan suatu tugas dalam kondisi tertentu. Tingkat beban kerja mental dipengaruhi oleh kompleksitas tugas, keterbatasan kapasitas kognitif individu, serta kondisi lingkungan kerja. Oleh karena itu, pengukuran yang akurat terhadap beban kerja mental sangat penting untuk memahami bagaimana individu memproses informasi, mengalokasikan perhatian, serta mempertahankan performa dalam situasi yang menuntut kemampuan kognitif tinggi.

6.4.1 Metode Subjektif

Metode subjektif merupakan pendekatan yang mengukur beban kerja mental berdasarkan persepsi individu terhadap tuntutan tugas yang mereka alami. Metode ini biasanya menggunakan kuesioner atau skala penilaian yang diisi oleh responden setelah menyelesaikan suatu tugas tertentu. Pendekatan subjektif banyak digunakan dalam penelitian karena relatif mudah diterapkan, tidak memerlukan perangkat teknologi khusus, serta mampu menangkap pengalaman kognitif yang dirasakan oleh individu secara langsung.

Salah satu instrumen subjektif yang paling banyak digunakan adalah *NASA Task Load Index* (NASA-TLX). Instrumen ini mengukur beban kerja melalui enam dimensi

utama, yaitu *mental demand*, *physical demand*, *temporal demand*, *performance*, *effort*, dan *frustration*. Keenam dimensi tersebut memberikan gambaran multidimensional mengenai beban kerja yang dialami individu dalam suatu tugas. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa NASA-TLX memiliki reliabilitas uji ulang yang baik hingga sangat baik, dengan nilai *intraclass correlation coefficient* (ICC) antara 0,71 hingga 0,81 pada populasi lanjut usia. Selain itu, instrumen ini juga menunjukkan validitas konvergen dengan indikator objektif seperti *Index of Cognitive Activity* (ICA) dan komponen *event-related potential* (ERP), yang menunjukkan bahwa skor NASA-TLX berkorelasi dengan indikator neurofisiologis dari beban kerja mental (Devos *et al.*, 2020).

Penggunaan NASA-TLX umumnya dilakukan setelah individu menyelesaikan blok tugas tertentu. Waktu administrasi, kompleksitas tugas, serta tingkat kelelahan dapat memengaruhi hasil penilaian, sehingga konsistensi dalam prosedur administrasi sangat penting untuk menjaga reliabilitas instrumen. Selain itu, penggunaan versi RAW-TLX sering direkomendasikan untuk meningkatkan sensitivitas pengukuran pada berbagai tingkat kompleksitas tugas (Devos *et al.*, 2020).

Selain NASA-TLX, metode subjektif lain yang sering digunakan adalah *Subjective Workload Assessment Technique* (SWAT). Instrumen ini mengukur beban kerja berdasarkan tiga dimensi utama, yaitu waktu (*time load*), usaha mental (*mental effort*), dan tingkat stres psikologis (*psychological stress*). Meskipun SWAT telah digunakan dalam beberapa penelitian ergonomi dan sistem operasi kompleks, bukti psikometrik mengenai reliabilitas dan validitasnya masih relatif lebih terbatas dibandingkan dengan NASA-TLX. Oleh

karena itu, beberapa penelitian menyarankan penggunaan SWAT bersama dengan NASA-TLX dan indikator objektif untuk meningkatkan validitas interpretasi hasil pengukuran Gooderham (Devos *et al.*, 2020).

Meskipun metode subjektif memiliki banyak kelebihan, pendekatan ini juga memiliki keterbatasan. Penilaian subjektif dapat dipengaruhi oleh faktor psikologis seperti suasana hati, motivasi, atau cara individu memaknai suatu tugas. Selain itu, dalam beberapa populasi seperti lansia atau individu dengan gangguan kognitif, laporan subjektif mengenai beban kerja dapat berbeda dari indikator objektif seperti performa atau aktivitas neural. Oleh karena itu, literatur secara konsisten merekomendasikan penggunaan metode subjektif bersama dengan metode objektif untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai beban kerja mental (Devos *et al.*, 2020; González *et al.*, 2024).

6.4.2 Metode Berbasis Kinerja (*Performance-Based Measures*)

Metode berbasis kinerja merupakan pendekatan yang mengukur beban kerja mental melalui analisis performa individu dalam menyelesaikan suatu tugas. Pendekatan ini didasarkan pada asumsi bahwa peningkatan tuntutan kognitif akan memengaruhi kemampuan individu dalam memproses informasi dan menyelesaikan tugas secara efisien.

Salah satu indikator yang paling umum digunakan adalah *reaction time (RT)* atau waktu reaksi. Waktu reaksi menggambarkan kecepatan individu dalam merespons stimulus atau membuat keputusan selama tugas berlangsung. Secara umum, peningkatan beban kerja mental berkorelasi dengan peningkatan waktu reaksi karena individu

memerlukan waktu lebih lama untuk memproses informasi dalam kondisi kognitif yang lebih kompleks (Devos *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2023; Kutz, 2026; Mitterová, 2025). Namun demikian, hubungan antara waktu reaksi dan beban kerja mental tidak selalu linear. Dalam beberapa situasi, individu yang telah terlatih dapat mempertahankan waktu reaksi yang stabil meskipun tuntutan tugas meningkat karena adanya proses otomatisasi atau strategi adaptif.

Indikator lain yang sering digunakan adalah *error rate* atau tingkat kesalahan. Peningkatan beban kerja mental sering kali menyebabkan peningkatan jumlah kesalahan dalam penyelesaian tugas, terutama pada kondisi tugas yang kompleks atau pada paradigma *dual-task* yang menuntut pembagian perhatian. Hal ini terjadi karena keterbatasan kapasitas pemrosesan informasi dalam sistem kognitif manusia. Ketika tuntutan tugas melebihi kapasitas tersebut, kemungkinan terjadinya kesalahan akan meningkat (Devos *et al.*, 2020; Kutz, 2026; Mitterová, 2025).

Selain tingkat kesalahan, akurasi tugas juga menjadi indikator penting dalam pengukuran beban kerja mental. Penurunan akurasi sering kali menunjukkan bahwa individu mengalami kesulitan dalam mempertahankan kualitas performa di bawah tekanan kognitif. Namun, dalam beberapa kasus individu dapat mempertahankan akurasi dengan mengorbankan kecepatan respons, sehingga muncul fenomena *speed-accuracy trade-off*. Oleh karena itu, analisis performa tugas sebaiknya mempertimbangkan secara simultan waktu reaksi, tingkat kesalahan, dan akurasi untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai kondisi kognitif individu.

Dalam konteks penelitian modern, paradigma *dual-task* sering digunakan untuk mengevaluasi dampak beban kerja mental terhadap performa. Paradigma ini melibatkan pelaksanaan dua tugas secara simultan sehingga menuntut alokasi sumber daya kognitif yang lebih kompleks. Biaya kinerja yang muncul akibat kondisi ini dikenal sebagai *dual-task cost*, yang sering digunakan sebagai indikator sensitivitas terhadap beban kerja mental. Penelitian menunjukkan bahwa biaya dual-task dapat menjadi indikator yang lebih sensitif terhadap perubahan kapasitas kognitif, terutama pada populasi lansia atau individu dengan gangguan kognitif (González *et al.*, 2024; Gooderham *et al.*, 2020; Kutz, 2026; Seifer *et al.*, 2025).

6.4.3 Metode Fisiologis

Metode fisiologis merupakan pendekatan objektif yang mengukur beban kerja mental melalui respons biologis tubuh terhadap aktivitas kognitif. Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengamati perubahan dalam sistem saraf dan sistem fisiologis yang terjadi ketika individu menghadapi tuntutan kognitif tertentu.

Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah *Electroencephalography (EEG)*. EEG merekam aktivitas listrik otak melalui elektroda yang ditempatkan pada kulit kepala dan memungkinkan peneliti mengidentifikasi pola aktivitas neural yang berkaitan dengan berbagai proses kognitif. Beberapa indikator EEG yang sering digunakan dalam penelitian beban kerja mental meliputi perubahan pada spektrum frekuensi theta dan beta serta komponen ERP seperti P3. Indikator-indikator tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan dalam perhatian, memori

kerja, dan efisiensi pemrosesan informasi selama tugas berlangsung (Ahmadnezhad *et al.*, 2023; González *et al.*, 2024; Hong *et al.*, 2022; Molcho *et al.*, 2022; Vrij & Leal, 2023).

Selain EEG, *heart rate variability (HRV)* juga merupakan indikator fisiologis yang banyak digunakan dalam penelitian beban kerja mental. HRV mengukur variasi interval antara detak jantung yang berturut-turut dan mencerminkan aktivitas sistem saraf otonom. Perubahan HRV sering dikaitkan dengan respons tubuh terhadap stres mental atau kelelahan kognitif. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa HRV dapat memberikan informasi yang lebih sensitif mengenai kondisi stres dan beban kerja mental dibandingkan dengan pengukuran detak jantung saja (Akhlaq *et al.*, 2025; Neri *et al.*, 2025; Tomes *et al.*, 2025).

Indikator fisiologis lain yang banyak digunakan adalah *pupil dilation* atau pelebaran pupil. Perubahan diameter pupil diketahui berkorelasi dengan tingkat usaha mental yang dilakukan individu. Ketika tuntutan kognitif meningkat, sistem saraf otonom akan memicu pelebaran pupil sebagai respons terhadap peningkatan aktivitas kognitif. Salah satu indikator yang dikembangkan dari pengukuran ini adalah *Index of Cognitive Activity (ICA)*, yang memberikan estimasi tingkat usaha mental secara real-time selama individu melakukan tugas tertentu (Devos *et al.*, 2020; Kahya *et al.*, 2018; Klotzbier *et al.*, 2025).

Selain itu, *eye tracking* juga menjadi metode penting dalam pengukuran beban kerja mental. Teknologi ini memungkinkan peneliti memantau pola gerakan mata, durasi fiksasi, serta distribusi perhatian visual selama individu berinteraksi dengan sistem atau lingkungan tertentu. Analisis data eye-tracking memberikan informasi mengenai

bagaimana individu mengalokasikan perhatian dan memproses informasi visual dalam suatu tugas (Kelly & Goldsmith, 2004; Saeed *et al.*, 2025).

6.4.4 Integrasi Multimetode dalam Pengukuran Beban Kerja Mental

Literatur menunjukkan bahwa pendekatan yang paling reliabel dalam mengukur beban kerja mental adalah pendekatan **multimodal** yang menggabungkan metode subjektif, metode kinerja, dan metode fisiologis secara simultan. Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengidentifikasi hubungan antara persepsi individu terhadap tuntutan tugas, dampak beban kerja terhadap performa, serta respons fisiologis yang terjadi selama proses kognitif berlangsung

Triangulasi antara berbagai metode pengukuran juga memungkinkan peneliti mengidentifikasi situasi di mana indikator-indikator tersebut tidak sepenuhnya selaras. Misalnya, dalam beberapa kondisi individu dapat mempertahankan performa yang baik meskipun mengalami peningkatan beban kerja mental melalui strategi kompensasi atau peningkatan aktivitas neural. Oleh karena itu, integrasi berbagai metode pengukuran memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika beban kerja mental dalam berbagai konteks interaksi manusia dengan teknologi (Devos *et al.*, 2020; Kahya *et al.*, 2018; Klotzbier *et al.*, 2025; Mitterová, 2025; Saeed *et al.*, 2025).

6.5 Metode Pengukuran Kognitif

Pengukuran kognitif merupakan komponen penting dalam penelitian psikologi kognitif, ergonomi kognitif, serta interaksi manusia-komputer (*human-computer interaction*). Dalam konteks penelitian beban kerja mental (*mental workload*), metode pengukuran kognitif digunakan untuk memahami bagaimana individu memproses informasi, mengalokasikan perhatian, serta mempertahankan performa ketika menghadapi tuntutan tugas yang kompleks. Melalui pengukuran kognitif, peneliti dapat mengidentifikasi keterbatasan kapasitas memori kerja, efisiensi kontrol eksekutif, serta dinamika interaksi antara proses kognitif dan performa tugas.

Dalam literatur penelitian modern, pengukuran kognitif tidak lagi terbatas pada satu pendekatan tunggal. Sebaliknya, pendekatan yang lebih komprehensif menggabungkan berbagai metode, mulai dari tes kognitif tradisional hingga teknologi neuroimaging dan sistem pemantauan berbasis sensor digital. Tes kognitif klasik seperti **Stroop test**, **n-back test**, dan **digit span test** secara rutin digunakan dalam penelitian beban kerja mental dan memori kerja untuk mengevaluasi kapasitas kognitif individu sekaligus memanipulasi tingkat tuntutan kognitif dalam eksperimen. Tes tersebut sering kali diintegrasikan dalam paradigma eksperimental yang lebih kompleks, seperti eksperimen *dual-task*, multitasking, atau studi interaksi manusia-komputer, serta dikombinasikan dengan metrik performa tugas seperti waktu reaksi, akurasi, dan tingkat kesalahan untuk mengevaluasi perubahan performa di bawah kondisi beban

kerja yang berbeda (Devos *et al.*, 2020; Hafiz *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2023).

6.5.1 Tes Kognitif Tradisional

Tes kognitif tradisional merupakan pendekatan klasik yang telah lama digunakan untuk mengukur fungsi kognitif seperti perhatian, memori kerja, dan kontrol eksekutif. Dalam penelitian beban kerja mental, tes-tes ini tidak hanya digunakan untuk mengukur kapasitas kognitif dasar, tetapi juga sebagai alat untuk memanipulasi tingkat tuntutan kognitif dalam eksperimen.

a. Stroop test

Stroop test merupakan salah satu instrumen paling terkenal dalam pengukuran kontrol perhatian dan inhibisi kognitif. Dalam tugas ini, peserta diminta menyebutkan warna tinta dari suatu kata yang sering kali tidak sesuai dengan makna kata tersebut. Ketidaksesuaian antara makna kata dan warna tinta menghasilkan efek interferensi yang menuntut kontrol eksekutif yang lebih tinggi.

Dalam penelitian beban kerja mental, Stroop test sering digunakan untuk meningkatkan tuntutan kognitif dalam paradigma multitasking atau *dual-task*. Ketika tugas ini dikombinasikan dengan tugas lain, tingkat interferensi meningkat sehingga memerlukan alokasi sumber daya kognitif yang lebih besar.

Pengukuran performa dalam Stroop test biasanya didasarkan pada beberapa metrik utama, yaitu waktu reaksi untuk respons yang benar, tingkat akurasi, serta ukuran efek interferensi yang dihitung dari selisih waktu reaksi antara kondisi kongruen dan inkongruen. Peningkatan waktu reaksi

dan penurunan akurasi sering diinterpretasikan sebagai indikator peningkatan beban kerja kognitif dan penurunan efisiensi kontrol perhatian (Satheesan, 2025; Trinesh & Uppunda, 2025; Zirek *et al.*, 2018).

b. N-back Test

N-back test merupakan salah satu metode paling populer untuk mengukur kapasitas memori kerja. Dalam tugas ini, peserta diminta untuk mengidentifikasi apakah stimulus yang muncul saat ini sama dengan stimulus yang muncul beberapa langkah sebelumnya. Tingkat kesulitan dapat dimanipulasi dengan meningkatkan nilai n , misalnya dari 1-back hingga 3-back.

Dalam penelitian beban kerja mental, peningkatan tingkat n secara langsung meningkatkan tuntutan memori kerja karena peserta harus mempertahankan dan memperbarui informasi secara berkelanjutan. Oleh karena itu, n-back sering digunakan sebagai indikator sensitif untuk mengevaluasi kapasitas memori kerja dan batas kemampuan kognitif dalam kondisi multitasking atau beban perhatian tinggi (Devos *et al.*, 2020; Klotzbier *et al.*, 2025; Nishida *et al.*, 2024; Vrij & Leal, 2023).

Metrik yang digunakan dalam analisis performa n-back biasanya meliputi tingkat akurasi, waktu reaksi untuk respons benar, serta indeks sensitivitas seperti d' atau A' . Dalam eksperimen *dual-task*, peneliti juga menghitung *dual-task costs* untuk mengevaluasi penurunan performa ketika tugas memori kerja dilakukan bersamaan dengan tugas lain (Devos *et al.*, 2020; Klotzbier *et al.*, 2025; Vrij & Leal, 2023).

6.5.2 Metode Neuroimaging

Metode neuroimaging memberikan perspektif yang lebih mendalam mengenai dasar neural dari beban kerja kognitif dengan memungkinkan pengamatan langsung terhadap aktivitas otak selama individu melakukan suatu tugas.

a. Electroencephalography (EEG)

EEG merupakan teknik neurofisiologis yang mengukur aktivitas listrik otak melalui elektroda yang ditempatkan di kulit kepala. Keunggulan utama EEG adalah resolusi temporalnya yang sangat tinggi, sehingga memungkinkan peneliti memantau perubahan aktivitas neural dalam skala milidetik.

Dalam penelitian beban kerja mental, EEG sering digunakan untuk mengidentifikasi perubahan aktivitas pada pita frekuensi tertentu, seperti peningkatan aktivitas **theta** yang berkaitan dengan peningkatan beban memori kerja, serta komponen ERP seperti **P3** yang mencerminkan alokasi perhatian terhadap stimulus relevan (Molcho *et al.*, 2022; Nishida *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2023).

b. Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS)

fNIRS merupakan teknik neuroimaging non-invasif yang mengukur perubahan oksigenasi darah pada korteks otak. Metode ini relatif portabel dan lebih toleran terhadap gerakan dibandingkan teknik lain, sehingga cocok untuk eksperimen yang melibatkan aktivitas nyata.

Penelitian menunjukkan bahwa perubahan aktivitas hemodinamik di area prefrontal cortex sering kali

berkorelasi dengan peningkatan beban kerja kognitif selama tugas memori kerja atau perhatian (Gonzalez *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2023).

c. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI)

fMRI memberikan peta spasial aktivitas otak yang sangat rinci dengan mengukur perubahan aliran darah yang terkait dengan aktivitas neural. Teknik ini memungkinkan peneliti mengidentifikasi jaringan otak yang terlibat dalam proses kognitif, seperti jaringan frontoparietal yang berperan dalam kontrol eksekutif dan memori kerja.

Namun demikian, penggunaan fMRI memiliki keterbatasan karena memerlukan lingkungan eksperimen yang sangat terkontrol serta membatasi pergerakan peserta (Molcho *et al.*, 2022; Nishida *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2023).

6.6 Aplikasi Beban Kerja Mental

Beban kerja mental (*mental workload* atau MW) merupakan konsep penting dalam studi kognitif, ergonomi, serta interaksi manusia-sistem yang menjelaskan bagaimana keterbatasan kapasitas pemrosesan informasi manusia memengaruhi kinerja dalam berbagai aktivitas profesional. Dalam konteks pekerjaan modern yang semakin kompleks dan berbasis teknologi, beban kerja mental tidak hanya berkaitan dengan jumlah tugas yang harus diselesaikan, tetapi juga dengan tingkat kompleksitas informasi, kebutuhan pengambilan keputusan, serta tuntutan perhatian yang berkelanjutan. Literatur menunjukkan bahwa beban kerja

mental memiliki pengaruh langsung terhadap kinerja, kesadaran situasional (*situational awareness*), serta kualitas pengambilan keputusan dalam berbagai sektor pekerjaan yang berisiko tinggi, seperti transportasi, industri, kesehatan, dan teknologi informasi. Ketika tuntutan tugas meningkat, beban kerja mental cenderung meningkat pula, yang pada akhirnya dapat menyebabkan respons yang lebih lambat, peningkatan tingkat kesalahan, serta penurunan kemampuan memonitor lingkungan kerja secara efektif. Meskipun demikian, pengalaman dan keahlian profesional dapat membantu individu mengembangkan strategi adaptif yang memungkinkan mereka mempertahankan kinerja meskipun berada dalam kondisi beban kognitif yang tinggi (Guru *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2025; Kahya *et al.*, 2018).

6.6.1 Aplikasi Beban Kerja Mental dalam Sektor Transportasi

Sektor transportasi merupakan salah satu bidang yang paling banyak diteliti dalam studi beban kerja mental karena karakteristik pekerjaannya yang sangat bergantung pada pengambilan keputusan cepat, pemantauan lingkungan secara berkelanjutan, serta interaksi intensif dengan sistem teknologi. Operator transportasi seperti pilot, masinis kereta, dan pengemudi kendaraan harus memproses informasi dari berbagai sumber secara simultan, termasuk instrumen navigasi, kondisi lingkungan, serta komunikasi operasional.

Penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja mental pada operator transportasi berkaitan dengan penurunan kinerja, terutama dalam bentuk peningkatan waktu reaksi dan penurunan akurasi dalam pengambilan keputusan. Dalam konteks mengemudi, misalnya, kondisi lalu

lintas yang padat, gangguan kognitif, atau penggunaan sistem navigasi dapat meningkatkan tuntutan kognitif sehingga memperlambat respons pengemudi terhadap bahaya di jalan. Selain itu, beban kerja mental yang tinggi dapat menurunkan kemampuan operator dalam mempertahankan kesadaran situasional, yaitu kemampuan untuk memantau kondisi lingkungan, memahami makna dari informasi yang diterima, serta memprediksi perkembangan situasi di masa depan (Jiang *et al.*, 2025; Kahya *et al.*, 2018).

Beban kerja mental juga memengaruhi kualitas pengambilan keputusan dalam sistem transportasi. Ketika tuntutan kognitif meningkat, individu cenderung menggunakan strategi pengambilan keputusan yang lebih sederhana atau heuristik untuk menghemat sumber daya kognitif. Akibatnya, keputusan yang diambil dapat menjadi lebih lambat atau kurang optimal dalam situasi tertentu. Namun demikian, pengalaman dan keahlian operator dapat mengurangi dampak negatif tersebut melalui proses otomatisasi keterampilan dan penggunaan skema kognitif yang lebih efisien. Dalam kondisi tertentu, keahlian ini bahkan dapat mempertahankan kinerja meskipun beban kerja mental meningkat (Ahmadnezhad *et al.*, 2023; Jiang *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2023).

6.6.2 Aplikasi Beban Kerja Mental dalam Industri dan Manufaktur

Dalam sektor industri dan manufaktur, beban kerja mental berkaitan erat dengan pengoperasian mesin, pemantauan proses produksi, serta pengambilan keputusan dalam situasi operasional yang kompleks. Operator mesin dan personel kontrol proses sering kali harus memantau berbagai

indikator sistem secara simultan, mengidentifikasi potensi kegagalan sistem, serta mengambil tindakan korektif dalam waktu singkat.

Salah satu faktor utama yang memengaruhi beban kerja mental dalam lingkungan industri adalah kompleksitas tugas. Pemantauan berbagai variabel proses, diagnosis kesalahan sistem, serta kebutuhan untuk merespons alarm atau gangguan secara cepat dapat meningkatkan tuntutan kognitif operator. Ketika informasi yang harus diproses terlalu banyak atau terlalu kompleks, risiko kesalahan operasional dan keterlambatan respons dapat meningkat (Guru *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2022).

Selain kompleksitas tugas, desain antarmuka manusia-mesin (*human-machine interface*) juga memiliki pengaruh penting terhadap beban kerja mental operator. Antarmuka yang terlalu kompleks atau menampilkan informasi yang tidak relevan dapat meningkatkan beban kognitif ekstrinsik, yaitu beban yang muncul akibat desain sistem yang kurang optimal. Sebaliknya, desain antarmuka yang sederhana dan terstruktur dapat membantu operator memfokuskan perhatian pada informasi yang paling penting, sehingga mengurangi beban kerja mental dan meningkatkan kinerja operasional (Devos *et al.*, 2023; Gramouseni *et al.*, 2023; Smith *et al.*, 2022).

Faktor lingkungan kerja juga berperan dalam menentukan tingkat beban kerja mental. Kondisi seperti kebisingan, pencahayaan yang buruk, getaran mesin, serta tekanan waktu dapat memperburuk kondisi kognitif pekerja, terutama ketika dikombinasikan dengan tuntutan tugas yang tinggi. Selain itu, faktor individu seperti pengalaman kerja, kapasitas kognitif, serta tingkat kelelahan juga memengaruhi

bagaimana pekerja merespons tuntutan kognitif dalam lingkungan industri (Downey *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2025; Sharma *et al.*, 2022).

6.7 Hubungan Beban Kerja Mental dan Performa Tugas dalam Ergonomi

Secara umum, literatur menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja mental berkorelasi dengan penurunan efisiensi pemrosesan informasi serta menurunnya performa tugas. Ketika individu menghadapi tuntutan kognitif yang tinggi, sumber daya kognitif yang terbatas harus dialokasikan secara selektif untuk memproses informasi yang relevan dengan tugas yang sedang dilakukan. Akibatnya, proses pemantauan lingkungan, pengambilan keputusan, dan respons terhadap stimulus dapat mengalami keterlambatan atau penurunan kualitas. Fenomena ini sering ditandai dengan meningkatnya waktu reaksi, menurunnya tingkat akurasi, serta meningkatnya frekuensi kesalahan dalam pelaksanaan tugas (Devos *et al.*, 2020; Skaramagkas *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023).

Dampak beban kerja mental juga terlihat secara jelas dalam kondisi multitugas atau *dual-tasking*, di mana individu harus menjalankan dua atau lebih tugas secara simultan. Dalam situasi tersebut, keterbatasan kapasitas perhatian menyebabkan terjadinya kompetisi sumber daya kognitif antar tugas, sehingga performa salah satu atau kedua tugas dapat mengalami penurunan. Penelitian menunjukkan bahwa biaya multitugas (*dual-task costs*) sering kali digunakan sebagai indikator penting untuk mengukur dampak beban kerja mental terhadap performa tugas. Peningkatan biaya

multitugas biasanya tercermin dalam penurunan akurasi atau peningkatan waktu reaksi ketika tugas tambahan diberikan kepada individu (Ahmadnezhad *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023).

Selain memengaruhi performa tugas secara langsung, beban kerja mental juga berdampak pada kesadaran situasional (*situational awareness*). Dalam kondisi beban kognitif tinggi, perhatian individu cenderung terfokus pada aspek tertentu dari tugas yang sedang dikerjakan, sehingga kapasitas untuk memantau kondisi lingkungan yang lebih luas menjadi berkurang. Hal ini dapat meningkatkan risiko kesalahan atau kegagalan dalam mengantisipasi peristiwa yang tidak terduga, terutama dalam lingkungan kerja berisiko tinggi seperti transportasi dan industri (Skaramagkas *et al.*, 2023; Zhu *et al.*, 2023).

Namun demikian, hubungan antara beban kerja mental dan performa tidak selalu bersifat linear. Dalam beberapa situasi, individu dengan tingkat keahlian tinggi dapat mempertahankan performa meskipun menghadapi beban kerja mental yang tinggi. Hal ini terjadi karena pengalaman dan pelatihan memungkinkan individu mengotomatisasi sebagian proses kognitif yang diperlukan untuk menyelesaikan tugas tertentu. Dengan demikian, sebagian besar sumber daya kognitif dapat dialokasikan untuk aspek tugas yang lebih kompleks atau tidak terduga (Devos *et al.*, 2020; Skaramagkas *et al.*, 2023). Fenomena ini menunjukkan bahwa performa tugas saja tidak selalu dapat mencerminkan tingkat beban kerja mental yang sebenarnya, sehingga diperlukan pendekatan pengukuran yang lebih komprehensif

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadnezhad, P., Burns, J. M., Akinwuntan, A., Ranchet, M., Kondyli, A., Mahnken, J. D., & Devos, H. (2023). Driving Automation for Older Adults With Preclinical Alzheimer's Disease. *Gerontology*, 69(11), 1307–1314. <https://doi.org/10.1159/000531263>
- Akhlaq, M., Ejaz, H., Habib, M. S., Mukhtar, A., & Khawar, M. M. H. (2025). Concerns Regarding the Validity and Practicality of The CLAPs Instrument in Geriatric Cognitive Assessment. *Geriatrics and Gerontology International*, 25(8), 1161–1162. <https://doi.org/10.1111/ggi.70116>
- Bartolo, D. D. (2026). The Effects of Secondary Motor and Cognitive Tasks on Gait Depend on Functional Walking Ability in Non-Traumatic Neurological Patients: A Feasibility Pilot Study. *Applied Sciences*, 16(3), 1484. <https://doi.org/10.3390/app16031484>
- Beaulne-Séguin, Z., & Nantel, J. (2016). Conflicting and Non-Conflicting Visual Cues Lead to Error in Gait Initiation and Gait Inhibition in Individuals With Freezing of Gait. *Gait & Posture*, 49, 443–447. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.002>
- Chambers, R. M., & Whitmore, M. (1991). Individual Differences in Computerized Test Performance for Systems Integration in Cockpit Management. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 35(14), 996–1000. <https://doi.org/10.1177/154193129103501407>

- Devos, H., Gustafson, K. M., Ahmadnezhad, P., Liao, K., Mahnken, J. D., Brooks, W. M., & Burns, J. M. (2020). Psychometric Properties of NASA-TLX and Index of Cognitive Activity as Measures of Cognitive Workload in Older Adults. *Brain Sciences*, 10(12), 994. <https://doi.org/10.3390/brainsci10120994>
- Devos, H., Gustafson, K. M., Liao, K., Ahmadnezhad, P., Kuhlmann, E., Estes, B., Martin, L. E., Mahnken, J. D., Brooks, W. M., & Burns, J. M. (2023). Effect of Cognitive Reserve on Physiological Measures of Cognitive Workload in Older Adults With Cognitive Impairments. *Journal of Alzheimer's Disease*, 92(1), 141–151. <https://doi.org/10.3233/jad-220890>
- Diedrich, L., Kolhoff, H. I., Bergmann, C., Bähr, M., & Antal, A. (2024). Boosting Working Memory in the Elderly: Driving Prefrontal Theta–gamma Coupling via Repeated Neuromodulation. *Geroscience*, 47(2), 1425–1440. <https://doi.org/10.1007/s11357-024-01272-3>
- Downey, R., Bherer, L., Pothier, K., Vranceanu, T., Intzandt, B., Berryman, N., Lussier, M., Vincent, T., Karelis, A. D., Nigam, A., Vu, T. T. M., Bosquet, L., & Li, K. (2022). Multiple Routes to Help You Roam: A Comparison of Training Interventions to Improve Cognitive-Motor Dual-Tasking in Healthy Older Adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.710958>
- Fitzgibbon-Collins, L. K., Best, S., Noguchi, M., Guest, C., Borrie, M., Shoemaker, J. K., & Bhangu, J. (2025). Neurovascular Decoupling Underlies Dual-task Cost Across Cognitive Abilities. *Alzheimer S & Dementia Translational Research &*

- Clinical Interventions, 11(4).
<https://doi.org/10.1002/trc2.70156>
- Gogna, Y., Tiwari, S., & Singla, R. (2023). Towards a Versatile Mental Workload Modeling Using Neurometric Indices. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*, 68(3), 297–316. <https://doi.org/10.1515/bmt-2022-0479>
- Gonzalez, A. G., Salgado, D. R., & Moruno, L. G. (2015). Optimisation of a laparoscopic tool handle dimension based on ergonomic analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 48, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.03.007>
- González, C. C. O., Ranchod, S., & Rakobowchuk, M. (2024). Using Multivariate Partial Least Squares on fNIRS Data to Examine Load-Dependent Brain-Behaviour Relationships in Aging. *Plos One*, 19(10), e0312109. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0312109>
- Gooderham, G. K., Ho, S., & Handy, T. C. (2020). Corrigendum: Variability in Executive Control Performance Is Predicted by Physical Activity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00115>
- Gramouseni, F., Tzimourta, K. D., Angelidis, P., Γιαννακέας, N., & Tsipouras, M. G. (2023). Cognitive Assessment Based on Electroencephalography Analysis in Virtual and Augmented Reality Environments, Using Head Mounted Displays: A Systematic Review. *Big Data and Cognitive Computing*, 7(4), 163. <https://doi.org/10.3390/bdcc7040163>
- Guru, K. A., Esfahani, E. T., Raza, S. J., Bhat, R., Wang, K., Hammond, Y., Wilding, G. E., Peabody, J. O., & Chowriappa, A. (2014). Cognitive Skills Assessment During Robot-assisted Surgery: Separating the Wheat From the Chaff. *British Journal of*

- Urology, 115(1), 166–174. <https://doi.org/10.1111/bju.12657>
- Hafiz, P., Maxhuni, A., & Bardram, J. E. (2020). Analysis of Perceived Human Factors and Participants' Demographics During a Cognitive Assessment Study With a Smartwatch. 1–10. <https://doi.org/10.1109/ichi48887.2020.9374342>
- Hong, L., Zeng, Q., Li, K., Luo, X., Xu, X., Liu, X., Li, Z., Fu, Y., Wang, Y., Zhang, T., Chen, Y., Liu, Z., Huang, P., & Zhang, M. (2022). Intrinsic Brain Activity of Inferior Temporal Region Increased in Prodromal Alzheimer's Disease With Hearing Loss. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 13. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.772136>
- Jiang, H., Mizobuchi, S., & Chignell, M. (2023). Lower Executive Function Ability May Lead to Higher Perceived Mental Workload in Driving Scenarios. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 67(1), 747–754. <https://doi.org/10.1177/21695067231192859>
- Jiang, H., Xie, Y., He, M., Li, J., Wu, F., Guo, H., Guo, Y., Xie, D., Mei, Y., & Gu, J. (2025). Highly Thermally Conductive And Flame-Retardant Waterborne Polyurethane Composites With 3D BNNS Bridging Structures via Magnetic Field Assistance. *Nano-Micro Letters*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01651-1>
- Kahya, M., Moon, S., Lyons, K. E., Pahwa, R., Akinwuntan, A., & Devos, H. (2018). Pupillary Response to Cognitive Demand in Parkinson's Disease: A Pilot Study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00090>
- Kalyuga, S. (2006). Rapid Cognitive Assessment of Learners' Knowledge Structures. *Learning and Instruction*, 16(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2005.12.002>

- Kelly, S. D., & Goldsmith, L. H. (2004). Gesture and Right Hemisphere Involvement in Evaluating Lecture Material. *Gesture*, 4(1), 25–42. <https://doi.org/10.1075/gest.4.1.03kel>
- Kleiman, M. J., & Galvin, J. E. (2024). High Frequency Post-Pause Word Choices and Task-Dependent Speech Behavior Characterize Connected Speech in Individuals With Mild Cognitive Impairment. *Journal of Alzheimer's Disease*, 102(3), 815–829. <https://doi.org/10.1177/13872877241291239>
- Klotzbier, T. J., Schott, N., Park, S., & Almeida, Q. J. (2025). Exploring Motor–Cognitive Interference Effects and the Influence of Self-Reported Physical Activity on Dual-Task Walking in Parkinson's Disease and Healthy Older Adults. *Brain Sciences*, 15(2), 114. <https://doi.org/10.3390/brainsci15020114>
- Kutz, D. F. (2026). Assessment of Dynamic Cerebral Blood Flow Changes During Cognitive Tasks in Patients With Post-Covid-19 Syndrome. *Brain Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcag036>
- Li, S., Xu, K., Wang, Y., Wang, M.-H., Li, S., Lin, F., & Jiang, Z.-L. (2025). Task-Specific Cortical Mechanisms of taVNS-paired Task-Oriented Training for Post-Stroke Upper Extremity Dysfunction Under Cognitive Load: An fNIRS Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 19. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1652612>
- Mitterová, K. (2025). Optimizing tACS for Working Memory: Differential Outcomes in Healthy Aging and Non-Amnesic Mild Cognitive Impairment. *Alzheimer S Research &*

- Therapy, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13195-025-01922-4>
- Molcho, L., Maimon, N. B., Regev-Plotnik, N., Rabinowicz, S., Intrator, N., & Sasson, A. (2022). Single-Channel EEG Features Reveal an Association With Cognitive Decline in Seniors Performing Auditory Cognitive Assessment. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.773692>
- Neri, G., Marshall, S. C., Chan, H. K., Yaghi, A., Tabor, D., Sinha, R., & Mazumdar, S. (2025). Data Visualization in AI-assisted Decision-Making: A Systematic Review. *Frontiers in Communication*, 10. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2025.1605655>
- Nishida, A., Shima, A., Kambe, D., Furukawa, K., Sakamaki-Tsukita, H., Yoshimura, K., Wada, I., Sakato, Y., Terada, Y., Sawamura, M., Nakanishi, E., Taruno, Y., Yamakado, H., Fushimi, Y., Okada, T., Nakamoto, Y., Takahashi, R., & Sawamoto, N. (2024). Frontoparietal-Striatal Network and Nucleus Basalis Modulation in Patients With Parkinson Disease and Gait Disturbance. *Neurology*, 103(3). <https://doi.org/10.1212/wnl.0000 000000 209606>
- Ranchet, M., Orlosky, J., Morgan, J. C., Qadir, S. H., Akinwuntan, A., & Devos, H. (2017). Pupillary Response to Cognitive Workload During Saccadic Tasks in Parkinson's Disease. *Behavioural Brain Research*, 327, 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2017.03.043>
- Saeed, A., Amjad, I., Niazi, I. K., Alzahrani, A. I. A., Shafiq, M., & Haavik, H. (2025). Effects of Balance-Based Exergame Training With Variable Difficulty on Balance and Spatiotemporal Gait Outcomes in Adults With Mild Cognitive Impairment: Randomized Controlled Trial. *Jmir*

Serious Games, 13, e74092. <https://doi.org/10.2196/74092>

- Satheesan, L. (2025). Hearing Loss in Young and Middle-Aged Adults as a Modifiable Risk Factor for Late-Life Dementia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Audiology Research*, 15(6), 174. <https://doi.org/10.3390/audiolres15060174>
- Seifer, A.-K., Küderle, A., Strobel, K., Hannemann, R., & Eskofier, B. M. (2025). The Effect of Hearing Aid Amplification on Gait Parameters: A Pilot Study Using Ear-Worn Motion Sensors. *Audiology Research*, 15(3), 45. <https://doi.org/10.3390/audiolres15030045>
- Shanbhag, N. M., Padmanabhan, J., Zhang, Z., Harel, B., Jia, H., Kangarloo, T., Yin, W., Dowling, A. V., Laurenza, A., Khudyakov, P., Galinsky, K., Latzman, R. D., Simuni, T., Weintraub, D., Horak, F. B., Lustig, C., Maruff, P., & Simen, A. A. (2025). An Acetylcholine M1 Receptor–Positive Allosteric Modulator (TAK-071) in Parkinson Disease With Cognitive Impairment. *Jama Neurology*, 82(2), 152. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2024.4519>
- Sharma, N. K., Rana, S., Kushwaha, P., & Gori, Y. (2022). Recent Advancements in Contactless Anthropometry. *International Journal of Materials Manufacturing and Sustainable Technologies*, 1(2), 1–9. <https://doi.org/10.56896/IJMMST.2022.1.2.007>
- Skaramagkas, V., Giannakakis, G., Ktistakis, E., Manousos, D., Karatzanis, I., Tachos, N. S., Tripoliti, E. E., Marias, K., Fotiadis, D. I., & Tsiknakis, M. (2023). Review of Eye Tracking Metrics Involved in Emotional and Cognitive Processes. *Ieee Reviews in Biomedical Engineering*, 16, 260–277. <https://doi.org/10.1109/rbme.2021.3066072>

- Smith, B., McCarthy, C., Dechenaud, M. E., Wong, M. C., Shepherd, J., & Heymsfield, S. B. (2022). Anthropometric evaluation of a 3D scanning mobile application. *Obesity*, 30(6), 1181–1188. <https://doi.org/10.1002/oby.23434>
- Thomas, A., Scandurra, G., & Carfora, A. (2021). Adoption of Green Innovations by SMEs: An Investigation About the Influence of Stakeholders. *European Journal of Innovation Management*, 25(6), 44–63. <https://doi.org/10.1108/ejim-07-2020-0292>
- Tomes, C., Schram, B., Canetti, E., & Orr, R. M. (2025). Heart Rate Variability Is More Sensitive to Stress Than Heart Rate in Specialist Police Undergoing Selection. *Plos One*, 20(1), e0317124. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317124>
- Trinesh, R., & Uppunda, A. K. (2025). Working Memory, Attention, and Speech Perception in Noise Abilities in Individuals With Auditory Neuropathy. *The Egyptian Journal of Otolaryngology*, 41(1). <https://doi.org/10.1186/s43163-025-00902-7>
- Vrij, A., & Leal, S. (2023). From Imposing Cognitive Load to Exploiting Different Strategies: A Reply to Brimbal *Et al.* (2023). *Legal and Criminological Psychology*, 30(1), 54–57. <https://doi.org/10.1111/lcrp.12256>
- Zhang, X., Wang, W., Ma, L., Wang, Z., & Hu, N. (2024). Cognitive Evaluation of HUD Interface Layout for Intelligent Automotive Based on Bayesian BWM and Gray-Topsis. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(3). <https://doi.org/10.1177/16878132241230227>

- Zhu, J., Zhang, J., Wang, Y., Ge, Y., Zhang, Z., & Zhang, S. (2023). Fire Detection in Ship Engine Rooms Based on Deep Learning. *Sensors*, 23(14), 6552. <https://doi.org/10.3390/s23146552>
- Zirek, E., Hüseyinsinoğlu, B. E., Tüfekçioğlu, Z., Bılıç, B., & Hanağası, H. (2018). Which Cognitive Dual-Task Walking Causes Most Interference on the Timed Up and Go Test in Parkinson's Disease: A Controlled Study. *Neurological Sciences*, 39(12), 2151–2157. <https://doi.org/10.1007/s10072-018-3564-2>

BAB 7

HUMAN ERROR DAN KESELAMATAN SISTEM KERJA

Oleh Tri Wisudawati

Perkembangan sektor industri yang semakin pesat membawa berbagai kemajuan dalam teknologi, sistem produksi, serta efisiensi operasional. Namun demikian, peningkatan kompleksitas sistem kerja juga diikuti oleh meningkatnya potensi risiko kecelakaan kerja.

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) menjadi aspek penting dalam pengelolaan organisasi modern karena berkaitan langsung dengan perlindungan tenaga kerja, keberlangsungan operasional perusahaan, serta produktivitas organisasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, penerapan sistem manajemen keselamatan kerja yang efektif menjadi kebutuhan mendasar dalam berbagai sektor industri (Goetsch, 2019).

Meskipun berbagai inovasi teknologi telah diterapkan untuk meningkatkan keselamatan kerja, fakta menunjukkan bahwa kecelakaan kerja masih sering terjadi. Berbagai studi menunjukkan bahwa sebagian besar kecelakaan kerja tidak hanya disebabkan oleh kegagalan teknis atau kerusakan peralatan, tetapi juga berkaitan erat dengan faktor manusia (*human factor*). Salah satu aspek utama dalam faktor manusia tersebut adalah *human error* atau kesalahan manusia dalam

menjalankan tugas atau aktivitas kerja (Reason, 1990). *Human error* didefinisikan sebagai kegagalan suatu tindakan yang direncanakan untuk mencapai hasil yang diharapkan atau penggunaan rencana yang tidak tepat untuk mencapai suatu tujuan. Dalam konteks keselamatan kerja, *human error* dapat terjadi pada berbagai tahapan aktivitas kerja, mulai dari proses pengambilan keputusan, interpretasi informasi, hingga pelaksanaan tindakan operasional di lapangan (Hollnagel, 2014). Kesalahan manusia dapat bersifat tidak disengaja seperti kesalahan persepsi, kelalaian, atau kegagalan memori, maupun kesalahan yang berkaitan dengan pelanggaran terhadap prosedur kerja yang telah ditetapkan.

Pendekatan klasik terhadap keselamatan kerja seringkali menempatkan *human error* sebagai penyebab utama kecelakaan yang bersumber dari individu pekerja. Namun, perkembangan teori keselamatan modern menunjukkan bahwa kesalahan manusia tidak dapat dipahami hanya sebagai kegagalan individu semata. Sebaliknya, *human error* sering kali merupakan manifestasi dari kelemahan sistem yang lebih luas, termasuk desain pekerjaan, prosedur operasional, kondisi lingkungan kerja, serta budaya keselamatan organisasi (Reason, 1997). Dengan demikian, analisis *human error* perlu dilakukan secara sistemik dengan mempertimbangkan interaksi antara manusia, teknologi, dan organisasi.

Dalam kerangka *human factors engineering* atau ergonomi, manusia dipandang sebagai bagian integral dari sistem kerja yang memiliki keterbatasan kognitif, fisik, maupun psikologis. Apabila sistem kerja tidak dirancang dengan mempertimbangkan karakteristik manusia tersebut, maka kemungkinan terjadinya kesalahan akan meningkat.

Oleh karena itu, pendekatan ergonomi dan rekayasa faktor manusia menjadi penting dalam merancang sistem kerja yang aman, efisien, dan andal (Stanton *et al.*, 2013).

7.1 Konsep Dasar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek fundamental dalam setiap aktivitas kerja, baik di sektor industri, jasa, maupun pendidikan. Perkembangan teknologi dan kompleksitas sistem kerja modern membawa konsekuensi meningkatnya potensi bahaya di tempat kerja. Risiko kecelakaan kerja, penyakit akibat kerja, serta kerugian material dan non-material menjadi isu yang tidak dapat diabaikan dalam pengelolaan organisasi.

Data global menunjukkan bahwa kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja masih menjadi penyebab utama kerugian produktivitas dan kesejahteraan pekerja. Hal ini menegaskan pentingnya penerapan K3 secara sistematis dan terintegrasi dalam setiap aktivitas kerja. Tidak hanya sebagai kewajiban regulatif, K3 juga merupakan investasi strategis untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan organisasi.

Selain itu, faktor manusia (*human factor*), termasuk kesalahan manusia (*human error*), turut berperan signifikan dalam terjadinya kecelakaan kerja. Oleh karena itu, pemahaman konsep dasar K3 menjadi penting sebagai landasan dalam mengidentifikasi, menganalisis, dan mengendalikan risiko di tempat kerja.

7.1.1 Prinsip-Prinsip Dasar K3 di Industri

Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di sektor industri didasarkan pada sejumlah prinsip dasar yang bertujuan untuk mencegah kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja, serta menciptakan lingkungan kerja yang aman dan produktif. Prinsip-prinsip ini menjadi pedoman dalam pengelolaan risiko di tempat kerja.

Prinsip pertama adalah identifikasi bahaya (*hazard identification*), yaitu proses sistematis untuk mengenali segala potensi bahaya yang dapat menimbulkan cedera, kerusakan, atau gangguan kesehatan. Bahaya ini dapat berasal dari mesin, bahan kerja, lingkungan, maupun perilaku manusia.

Prinsip kedua adalah penilaian risiko (*risk assessment*), yaitu kegiatan untuk menentukan tingkat risiko dari setiap bahaya yang telah diidentifikasi. Penilaian ini mempertimbangkan kemungkinan terjadinya kejadian serta tingkat keparahan dampaknya, sehingga dapat ditentukan prioritas penanganannya. Selanjutnya adalah pengendalian risiko (*risk control*), yaitu upaya untuk menghilangkan atau meminimalkan risiko. Pengendalian ini dilakukan berdasarkan hierarki pengendalian, yaitu eliminasi, substitusi, rekayasa teknik, pengendalian administratif, dan penggunaan alat pelindung diri (APD).

Prinsip berikutnya adalah kepatuhan terhadap peraturan dan standar, di mana setiap kegiatan industri harus mengikuti regulasi K3 yang berlaku, baik nasional maupun internasional. Kepatuhan ini menjadi dasar dalam menciptakan sistem kerja yang aman dan terstandar. Selain itu, terdapat prinsip partisipasi dan keterlibatan pekerja, di mana pekerja berperan aktif dalam penerapan K3, seperti

melaporkan potensi bahaya, mengikuti prosedur kerja aman, dan berkontribusi dalam program keselamatan.

Prinsip lainnya adalah pelatihan dan peningkatan kompetensi, yang menekankan pentingnya pembekalan pengetahuan dan keterampilan kepada tenaga kerja agar mampu bekerja secara aman dan memahami risiko pekerjaannya. Terakhir, prinsip perbaikan berkelanjutan (*continuous improvement*) menegaskan bahwa sistem K3 harus selalu dievaluasi dan ditingkatkan secara berkala berdasarkan hasil audit, inspeksi, maupun investigasi kecelakaan.

Secara keseluruhan, prinsip-prinsip dasar K3 di industri menekankan pendekatan sistematis, partisipatif, dan berkelanjutan dalam mengelola risiko kerja. Dengan penerapan prinsip-prinsip tersebut, diharapkan tercipta lingkungan kerja yang aman, sehat, dan produktif.

7.1.2 Sistem Manajemen Keselamatan Kerja

Sistem Manajemen Keselamatan Kerja merupakan pendekatan terstruktur dan sistematis yang digunakan oleh organisasi untuk mengelola risiko keselamatan di tempat kerja. Sistem ini dirancang untuk memastikan bahwa seluruh proses kerja berlangsung secara aman, efisien, dan sesuai dengan peraturan yang berlaku. Pada dasarnya, sistem manajemen keselamatan kerja mencakup serangkaian kebijakan, prosedur, serta praktik yang terintegrasi dalam kegiatan operasional organisasi. Sistem ini tidak hanya berfokus pada pencegahan kecelakaan, tetapi juga pada pengendalian risiko secara berkelanjutan melalui perencanaan, pelaksanaan, evaluasi, dan perbaikan.

Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam sistem manajemen keselamatan kerja adalah siklus Plan-Do-Check-Act (PDCA). Pada tahap *plan*, organisasi menetapkan kebijakan, tujuan, serta identifikasi risiko. Tahap *do* melibatkan implementasi program K3 sesuai perencanaan. Tahap *check* dilakukan melalui monitoring dan evaluasi kinerja keselamatan. Sedangkan tahap *act* merupakan tindak lanjut untuk perbaikan dan peningkatan sistem. Komponen utama dalam sistem manajemen keselamatan kerja meliputi komitmen manajemen, identifikasi bahaya dan pengendalian risiko, pelatihan dan kompetensi pekerja, komunikasi yang efektif, serta dokumentasi yang baik. Selain itu, audit internal dan tinjauan manajemen juga menjadi bagian penting dalam memastikan sistem berjalan sesuai dengan standar.

Penerapan sistem manajemen keselamatan kerja memberikan berbagai manfaat, antara lain mengurangi angka kecelakaan kerja, meningkatkan produktivitas, menjaga reputasi perusahaan, serta memenuhi persyaratan hukum dan standar internasional. Dengan demikian, sistem ini menjadi elemen penting dalam menciptakan budaya keselamatan yang berkelanjutan di lingkungan industri.

7.1.3 Standar Keselamatan Kerja

Standar keselamatan kerja merupakan seperangkat aturan, pedoman, dan persyaratan teknis yang digunakan sebagai acuan dalam menciptakan lingkungan kerja yang aman dan sehat. Standar ini disusun untuk memastikan bahwa setiap aktivitas kerja dilakukan sesuai dengan prinsip keselamatan, sehingga risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja dapat diminimalkan.

Standar keselamatan kerja dapat bersumber dari peraturan perundang-undangan nasional, standar internasional, maupun kebijakan internal perusahaan. Di Indonesia, penerapan standar keselamatan kerja mengacu pada berbagai regulasi, seperti Undang-Undang Keselamatan Kerja serta sistem manajemen K3 yang ditetapkan oleh pemerintah. Selain itu, banyak organisasi juga mengadopsi standar internasional seperti ISO 45001 sebagai pedoman dalam pengelolaan keselamatan kerja.

Secara umum, standar keselamatan kerja mencakup beberapa aspek penting, antara lain standar penggunaan peralatan kerja, prosedur operasional aman (*Standard Operating Procedure/SOP*), penggunaan alat pelindung diri (APD), pengendalian bahan berbahaya, serta penanganan keadaan darurat. Standar ini juga mengatur tata cara pelaporan dan investigasi kecelakaan kerja sebagai bagian dari upaya perbaikan berkelanjutan. Penerapan standar keselamatan kerja harus didukung oleh komitmen manajemen dan kepatuhan seluruh pekerja. Sosialisasi, pelatihan, serta pengawasan secara berkala menjadi kunci dalam memastikan bahwa standar tersebut dijalankan dengan konsisten. Tanpa implementasi yang baik, standar yang telah disusun tidak akan memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan keselamatan kerja.

7.2 Faktor Manusia dalam Sistem Kerja

Dalam sistem kerja modern, faktor manusia (*human factor*) merupakan elemen kunci yang sangat menentukan keberhasilan maupun kegagalan suatu sistem. Meskipun teknologi dan otomatisasi terus berkembang, peran manusia tetap tidak tergantikan, terutama dalam pengambilan

keputusan, pengendalian proses, serta interaksi dengan sistem kerja. Oleh karena itu, pemahaman terhadap faktor manusia menjadi penting dalam upaya meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan produktivitas kerja. Faktor manusia mencakup berbagai aspek yang mempengaruhi kinerja individu dalam bekerja, seperti kemampuan fisik, kognitif, psikologis, serta interaksi dengan lingkungan kerja. Ketidaksesuaian antara karakteristik manusia dengan tuntutan pekerjaan dapat menyebabkan kesalahan manusia (*human error*) yang berpotensi menimbulkan kecelakaan kerja maupun penurunan kinerja (Reason, 1990).

Menurut James Reason, kesalahan manusia bukan semata-mata disebabkan oleh kelalaian individu, tetapi juga oleh kelemahan dalam sistem kerja itu sendiri. Pendekatan ini menekankan bahwa kecelakaan kerja merupakan hasil interaksi kompleks antara manusia, teknologi, dan organisasi. Oleh karena itu, upaya pencegahan tidak hanya berfokus pada individu, tetapi juga pada perbaikan sistem secara keseluruhan. Selain itu, bidang Ergonomi berperan penting dalam mengkaji hubungan antara manusia dengan elemen sistem kerja. Ergonomi bertujuan untuk menyesuaikan pekerjaan dengan kemampuan dan keterbatasan manusia, sehingga dapat mengurangi kelelahan, meningkatkan kenyamanan, serta meminimalkan risiko kesalahan (Sanders & McCormick, 1993).

Faktor manusia juga berkaitan erat dengan aspek psikologis, seperti motivasi, stres kerja, kelelahan, dan beban kerja mental. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi konsentrasi dan pengambilan keputusan, yang pada akhirnya berdampak pada keselamatan kerja. Penelitian menunjukkan bahwa kelelahan dan tekanan kerja yang tinggi merupakan

salah satu penyebab utama terjadinya kecelakaan di lingkungan industri (Grandjean, 1988). Dalam konteks sistem kerja, manusia tidak hanya berperan sebagai operator, tetapi juga sebagai bagian dari sistem yang saling berinteraksi dengan mesin, prosedur, dan lingkungan kerja. Oleh karena itu, pendekatan sistem (*system approach*) diperlukan untuk memahami bagaimana faktor manusia berkontribusi terhadap kinerja keseluruhan sistem.

Dengan demikian, kajian mengenai faktor manusia dalam sistem kerja menjadi sangat penting sebagai dasar dalam merancang sistem kerja yang aman, efektif, dan berkelanjutan. Pemahaman ini juga menjadi landasan dalam pengembangan strategi pencegahan kecelakaan kerja berbasis *human-centered design*.

7.2.1 Hubungan Manusia, Mesin, dan Lingkungan

Dalam suatu sistem kerja, manusia, mesin, dan lingkungan merupakan tiga komponen utama yang saling berinteraksi dan membentuk suatu kesatuan yang tidak terpisahkan. Hubungan ketiganya menentukan tingkat keselamatan, efisiensi, serta produktivitas kerja. Ketidakseimbangan atau ketidaksesuaian di antara komponen tersebut dapat meningkatkan risiko kesalahan manusia (*human error*) dan kecelakaan kerja.

Manusia berperan sebagai pengendali utama yang mengoperasikan mesin dan mengambil keputusan, sedangkan mesin berfungsi sebagai alat bantu untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi kerja. Di sisi lain, lingkungan kerja menjadi konteks di mana interaksi tersebut berlangsung, termasuk kondisi fisik, kimia, biologis, dan sosial.

Menurut James Reason, kecelakaan kerja sering kali merupakan hasil dari kegagalan sistem yang melibatkan interaksi antara manusia dan elemen lain dalam sistem, termasuk mesin dan lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan sistem sangat penting dalam memahami dan mengelola risiko kerja.

7.2.2 Keterbatasan Manusia dalam Sistem Kerja

Manusia merupakan komponen utama dalam sistem kerja, namun memiliki berbagai keterbatasan yang dapat mempengaruhi kinerja dan keselamatan. Keterbatasan ini perlu dipahami agar sistem kerja dapat dirancang sesuai dengan kemampuan manusia, sehingga risiko kesalahan dan kecelakaan dapat diminimalkan.

Secara umum, keterbatasan manusia dapat dibedakan menjadi beberapa aspek. Pertama, **keterbatasan fisik**, seperti kekuatan otot, daya tahan tubuh, dan kelelahan. Pekerjaan dengan beban fisik tinggi atau durasi kerja yang panjang dapat menyebabkan kelelahan, yang pada akhirnya menurunkan konsentrasi dan meningkatkan risiko kecelakaan (Grandjean, 1988).

Kedua, **keterbatasan kognitif**, yang meliputi kemampuan dalam memproses informasi, perhatian, dan pengambilan keputusan. Manusia memiliki kapasitas terbatas dalam menerima dan mengolah informasi, terutama dalam kondisi kerja yang kompleks dan penuh tekanan. Hal ini dapat menyebabkan kesalahan dalam interpretasi maupun tindakan (Sanders & McCormick, 1993).

Ketiga, **keterbatasan psikologis**, seperti stres, motivasi, dan emosi. Kondisi psikologis yang tidak stabil dapat mempengaruhi perilaku kerja dan meningkatkan

kemungkinan terjadinya human error. Menurut James Reason, kesalahan manusia sering kali dipicu oleh kombinasi antara faktor individu dan kelemahan sistem kerja.

Keempat, **keterbatasan perseptual**, yaitu kemampuan indera dalam menerima rangsangan dari lingkungan, seperti penglihatan dan pendengaran. Kondisi lingkungan yang buruk, seperti pencahayaan yang kurang atau kebisingan yang tinggi, dapat mengganggu persepsi dan meningkatkan risiko kesalahan.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan pendekatan Ergonomi yang menyesuaikan pekerjaan, alat, dan lingkungan kerja dengan kemampuan manusia. Selain itu, pelatihan, pengaturan waktu kerja, serta perancangan sistem yang baik juga menjadi upaya penting dalam mengurangi dampak keterbatasan manusia.

7.3 Konsep dan Klasifikasi *Human Error*

Human error merupakan salah satu faktor utama yang berkontribusi terhadap terjadinya kecelakaan kerja dalam sistem industri. Secara umum, human error didefinisikan sebagai kegagalan manusia dalam melaksanakan suatu tindakan yang direncanakan atau penggunaan rencana yang tidak tepat untuk mencapai tujuan tertentu (Reason, 1990). Menurut James Reason, human error tidak hanya disebabkan oleh kesalahan individu, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi sistem kerja, seperti desain pekerjaan, lingkungan, serta faktor organisasi. Oleh karena itu, pendekatan sistem sangat penting dalam memahami dan mencegah terjadinya kesalahan manusia.

Secara konseptual, human error dapat terjadi pada berbagai tahapan aktivitas kerja, mulai dari persepsi, pengambilan keputusan, hingga pelaksanaan tindakan. Kesalahan ini sering kali dipengaruhi oleh faktor seperti kelelahan, kurangnya pelatihan, beban kerja yang tinggi, serta kondisi lingkungan kerja yang tidak mendukung.

Human error dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis utama, yaitu:

1. *Slip* (kesalahan tindakan tidak disengaja)
Terjadi ketika tindakan yang dilakukan tidak sesuai dengan rencana, biasanya akibat kurangnya perhatian atau gangguan. Contohnya adalah salah menekan tombol pada mesin.
2. *Lapse* (kesalahan akibat kelupaan)
Berkaitan dengan kegagalan memori, seperti lupa melakukan suatu langkah dalam prosedur kerja.
3. *Mistake* (kesalahan dalam pengambilan keputusan)
Terjadi ketika rencana atau keputusan yang diambil tidak tepat. Mistake dapat dibagi menjadi:
 - *Rule-based mistake*: kesalahan dalam menerapkan aturan atau prosedur
 - *Knowledge-based mistake*: kesalahan akibat kurangnya pengetahuan atau pengalaman
4. *Violation* (pelanggaran)
Merupakan tindakan menyimpang dari prosedur yang telah ditetapkan, baik disengaja maupun tidak. Pelanggaran ini sering dipengaruhi oleh budaya kerja atau tekanan organisasi.

Klasifikasi ini membantu dalam mengidentifikasi jenis kesalahan yang terjadi sehingga dapat ditentukan langkah pencegahan yang tepat. Misalnya, slip dan lapse dapat

diminimalkan melalui perbaikan desain sistem dan lingkungan kerja, sedangkan *mistake* dan *violation* memerlukan pendekatan pelatihan, pengawasan, serta perbaikan budaya organisasi. Dengan memahami konsep dan klasifikasi human error, organisasi dapat mengembangkan strategi pengendalian yang lebih efektif, baik melalui pendekatan teknis, administratif, maupun perilaku. Hal ini penting untuk menciptakan sistem kerja yang lebih aman dan andal.

7.3.1 Error, Violation, dan Unsafe Act

Dalam konteks keselamatan dan kesehatan kerja (K3), pemahaman mengenai *error*, *violation*, dan *unsafe act* sangat penting karena ketiganya merupakan penyebab utama terjadinya kecelakaan kerja. Ketiga konsep ini saling berkaitan, namun memiliki perbedaan mendasar dalam karakteristik dan penyebabnya.

Error (kesalahan) merupakan tindakan yang tidak disengaja yang menyebabkan hasil kerja tidak sesuai dengan yang diharapkan. Error biasanya terjadi akibat keterbatasan manusia, seperti kurangnya perhatian, kelelahan, atau kesalahan dalam pengambilan keputusan. Menurut James Reason (1990), error dapat diklasifikasikan menjadi *slip*, *lapse*, dan *mistake*, yang masing-masing berkaitan dengan kegagalan pada tahap tindakan, memori, dan perencanaan.

Berbeda dengan *error*, *violation* (pelanggaran) adalah tindakan menyimpang dari prosedur atau aturan yang telah ditetapkan dan dilakukan secara sengaja. Pelanggaran ini tidak selalu disebabkan oleh niat buruk, tetapi sering kali dipengaruhi oleh faktor organisasi, seperti tekanan waktu, budaya kerja yang tidak mendukung keselamatan, atau

kurangnya pengawasan. Reason (1990) membedakan violation menjadi beberapa jenis, seperti pelanggaran rutin, situasional, dan eksepsional.

Sementara itu, *unsafe act* (tindakan tidak aman) merupakan perilaku atau tindakan pekerja yang dapat meningkatkan risiko terjadinya kecelakaan. Unsafe act mencakup baik error maupun violation, sehingga dapat dikatakan sebagai bentuk nyata dari perilaku tidak aman di tempat kerja. Contoh *unsafe act* antara lain tidak menggunakan alat pelindung diri (APD), mengoperasikan mesin tanpa prosedur yang benar, atau bekerja dalam kondisi tidak aman. Menurut Heinrich (1980), sekitar 80–90% kecelakaan kerja disebabkan oleh *unsafe act*, sedangkan sisanya disebabkan oleh kondisi tidak aman (*unsafe condition*). Meskipun demikian, pendekatan modern menekankan bahwa *unsafe act* tidak hanya disebabkan oleh individu, tetapi juga oleh faktor sistem, seperti desain pekerjaan, lingkungan kerja, dan kebijakan organisasi. Pemahaman terhadap perbedaan antara *error*, *violation*, dan *unsafe act* sangat penting dalam menentukan strategi pencegahan kecelakaan kerja. *Error* dapat diminimalkan melalui perbaikan desain sistem dan pelatihan, sedangkan violation memerlukan pendekatan manajerial dan budaya keselamatan. Sementara itu, pengendalian *unsafe act* membutuhkan kombinasi dari pendekatan teknis, administratif, dan perilaku

7.3.2 Human Error dalam Berbagai Sektor Industri

Human error merupakan salah satu faktor dominan penyebab kecelakaan kerja di berbagai sektor industri. Meskipun setiap sektor memiliki karakteristik dan risiko yang

berbeda, kesalahan manusia tetap menjadi elemen penting yang mempengaruhi keselamatan dan kinerja sistem kerja.

Pada sektor industri manufaktur, human error sering terjadi dalam bentuk kesalahan operasional, seperti salah pengaturan mesin, kelalaian dalam mengikuti prosedur, atau kurangnya penggunaan alat pelindung diri (APD). Kesalahan ini umumnya dipengaruhi oleh faktor kelelahan, monotonitas pekerjaan, serta kurangnya pelatihan (Sanders & McCormick, 1993).

Di sektor konstruksi, human error banyak berkaitan dengan perilaku tidak aman (*unsafe act*), seperti bekerja tanpa perlindungan yang memadai, mengabaikan prosedur keselamatan, atau kurangnya kesadaran terhadap bahaya. Tekanan waktu, kondisi lingkungan yang dinamis, serta koordinasi tim yang kompleks menjadi faktor pemicu utama (Heinrich, 1980).

Pada sektor transportasi, seperti penerbangan dan perkeretaapian, human error dapat berdampak sangat besar karena melibatkan keselamatan banyak orang. Kesalahan dapat terjadi dalam pengambilan keputusan, komunikasi, maupun pengoperasian sistem. Menurut James Reason (1990), kecelakaan di sektor ini sering kali merupakan hasil dari akumulasi kesalahan kecil dalam sistem yang kompleks. Sementara itu, di sektor kesehatan, human error dapat berupa kesalahan diagnosis, pemberian obat, atau prosedur medis. Faktor seperti beban kerja tinggi, kelelahan, serta tekanan emosional menjadi penyebab utama kesalahan dalam sektor ini (Reason, 1990).

Pada sektor minyak dan gas, human error sering dikaitkan dengan kegagalan dalam mengikuti prosedur keselamatan, kesalahan dalam pengoperasian peralatan, serta

kurangnya komunikasi antar tim. Mengingat tingginya risiko ledakan dan kebakaran, kesalahan kecil dapat berakibat fatal.

Secara umum, human error di berbagai sektor industri dipengaruhi oleh kombinasi faktor individu, lingkungan kerja, teknologi, dan organisasi. Oleh karena itu, pendekatan sistem yang komprehensif diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengendalikan potensi kesalahan.

7.4 Faktor Penyebab *Human Error*

Human error merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor yang mempengaruhi kinerja manusia dalam sistem kerja. Kesalahan ini tidak hanya disebabkan oleh individu, tetapi juga oleh kondisi lingkungan, desain pekerjaan, serta faktor organisasi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap faktor penyebab human error sangat penting dalam upaya pencegahan kecelakaan kerja.

Salah satu faktor utama adalah faktor individu, yang meliputi kondisi fisik, mental, dan kemampuan pekerja. Kelelahan, kurangnya keterampilan, serta keterbatasan kognitif seperti perhatian dan memori dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan (Grandjean, 1988). Selain itu, faktor psikologis seperti stres, motivasi rendah, dan tekanan kerja juga berkontribusi terhadap *human error*.

Faktor berikutnya adalah faktor pekerjaan (*task factor*), yang berkaitan dengan karakteristik tugas yang dilakukan. Pekerjaan yang kompleks, monoton, atau memiliki beban kerja tinggi cenderung meningkatkan risiko kesalahan. Kurangnya kejelasan prosedur kerja serta desain tugas yang tidak ergonomis juga dapat memicu terjadinya *error* (Sanders & McCormick, 1993).

Selanjutnya, faktor lingkungan kerja turut mempengaruhi kinerja manusia. Kondisi seperti pencahayaan yang buruk, kebisingan tinggi, suhu ekstrem, serta paparan bahan berbahaya dapat mengganggu konsentrasi dan persepsi pekerja, sehingga meningkatkan potensi kesalahan (Grandjean, 1988).

Faktor lain yang tidak kalah penting adalah faktor organisasi, yang meliputi budaya keselamatan, sistem manajemen, komunikasi, serta kebijakan perusahaan. Menurut James Reason (1990), kelemahan dalam sistem organisasi, seperti kurangnya pengawasan, pelatihan yang tidak memadai, dan tekanan produksi, dapat menciptakan kondisi laten yang memicu terjadinya kecelakaan kerja.

Selain itu, faktor teknologi dan desain sistem juga berperan dalam terjadinya *human error*. Antarmuka mesin yang tidak *user-friendly*, kurangnya standar operasional yang jelas, serta sistem yang kompleks dapat menyulitkan pekerja dalam menjalankan tugasnya dengan benar (Hollnagel, 1998).

Secara keseluruhan, *human error* merupakan hasil dari kombinasi berbagai faktor yang saling berinteraksi dalam sistem kerja. Oleh karena itu, upaya pencegahan harus dilakukan secara komprehensif dengan memperhatikan aspek manusia, pekerjaan, lingkungan, dan organisasi.

7.5 Studi Kasus dan Aplikasi di Industri

Human error merupakan salah satu faktor dominan dalam terjadinya kecelakaan kerja di berbagai sektor industri. Dalam sistem kerja yang kompleks, kesalahan manusia tidak hanya berasal dari individu, tetapi juga dipengaruhi oleh interaksi antara manusia, mesin, lingkungan, dan organisasi.

7.5.1 *Human Error* pada Industri Manufaktur

Salah satu contoh *human error* yang sering terjadi di industri manufaktur adalah kecelakaan pada penggunaan mesin press. Dalam sebuah kasus di industri otomotif, seorang operator mengalami cedera serius pada tangan akibat terjepit mesin press saat proses produksi berlangsung.

Kejadian ini bermula ketika operator melakukan proses pemasangan komponen pada mesin press secara manual. Pada saat yang sama, mesin tiba-tiba aktif karena sistem pengaman (*safety guard*) tidak berfungsi dengan baik. Operator diketahui tidak mengikuti prosedur penguncian mesin (*lockout/tagout*), serta mengabaikan penggunaan alat pelindung diri (APD). Akibatnya, tangan operator terjepit saat mesin beroperasi.

Menurut James Reason (1990), kecelakaan seperti ini dapat dikategorikan sebagai kombinasi antara *slip* (kesalahan tindakan) dan *violation* (pelanggaran prosedur). Operator secara tidak sengaja melakukan tindakan yang tidak aman, sekaligus mengabaikan prosedur keselamatan yang telah ditetapkan.

Heinrich (1980) menyatakan bahwa sebagian besar kecelakaan kerja di industri disebabkan oleh tindakan tidak aman (*unsafe act*), namun pendekatan modern menekankan bahwa faktor organisasi dan sistem kerja juga berkontribusi secara signifikan.

7.5.2 *Human Error* pada Sistem Transportasi

Salah satu contoh paling terkenal dari *human error* dalam sistem transportasi adalah kecelakaan penerbangan di Tenerife pada tahun 1977. Kecelakaan ini melibatkan dua pesawat Boeing 747 yang bertabrakan di landasan pacu

Bandara Los Rodeos (Spanyol), mengakibatkan ratusan korban jiwa dan menjadi salah satu kecelakaan penerbangan terburuk dalam sejarah.

Kecelakaan terjadi ketika pilot pesawat KLM melakukan lepas landas tanpa izin yang jelas dari pengatur lalu lintas udara (*Air Traffic Control/ATC*). Pada saat yang sama, pesawat Pan Am masih berada di landasan yang sama dan belum sepenuhnya keluar dari jalur. Kondisi cuaca yang berkabut tebal memperburuk visibilitas, sehingga kedua pilot tidak dapat saling melihat.

7.5.3 *Human Error* pada Industri Energi

Salah satu contoh paling signifikan dari *human error* dalam industri energi adalah kecelakaan nuklir Chernobyl yang terjadi pada tahun 1986 di Ukraina (saat itu bagian dari Uni Soviet). Kecelakaan ini mengakibatkan ledakan reaktor nuklir yang menyebabkan dampak radiasi luas terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Kecelakaan terjadi saat dilakukan uji coba keselamatan pada reaktor. Operator melakukan serangkaian tindakan yang tidak sesuai dengan prosedur, termasuk menonaktifkan sistem keselamatan penting. Selain itu, operator juga melanjutkan pengujian dalam kondisi reaktor yang tidak stabil. Kombinasi keputusan yang salah dan pelanggaran prosedur ini akhirnya memicu ledakan.

7.5.4 Analisis Kasus Nyata Kecelakaan Kerja

Untuk mengurangi risiko *human error*, berbagai metode dan pendekatan telah diterapkan di industri, antara lain:

1. Pendekatan Ergonomi

Penerapan prinsip Ergonomi untuk menyesuaikan pekerjaan dengan kemampuan manusia, sehingga dapat mengurangi kelelahan dan kesalahan kerja.

2. Pelatihan dan Simulasi

Program pelatihan yang berkelanjutan serta simulasi kondisi darurat untuk meningkatkan keterampilan dan kesiapsiagaan pekerja.

3. Standarisasi Prosedur (SOP)

Penyusunan prosedur kerja yang jelas dan terstruktur untuk meminimalkan variasi tindakan dan kesalahan operasional.

4. Penerapan Teknologi dan Otomatisasi

Penggunaan sistem otomatis dan alat bantu untuk mengurangi ketergantungan pada manusia serta mendeteksi kesalahan lebih dini.

5. *Human Reliability Analysis* (HRA)

Metode analisis untuk mengidentifikasi potensi kesalahan manusia dan mengevaluasi tingkat keandalannya dalam sistem kerja.

6. Penguatan Budaya Keselamatan (*Safety Culture*)

Membangun kesadaran dan komitmen terhadap keselamatan di seluruh level organisasi.

7. Sistem Pelaporan dan Evaluasi Insiden

Mendorong pelaporan kejadian *near miss* dan melakukan investigasi sebagai dasar perbaikan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Grandjean, E. (1988) *Fitting the Task to the Man*. London: Taylor & Francis.
- Goetsch, D. L. (2019) *Occupational Safety and Health for Technologists, Engineers, and Managers*. 9th edn. Pearson.
- Heinrich, H. W. (1980) *Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach*. New York: McGraw-Hill.
- Hollnagel, E. (1998) *Cognitive Reliability and Error Analysis Method*. Oxford: Elsevier.
- Hollnagel, E. (2014) *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*. Ashgate Publishing.
- Reason, J. (1990) *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Reason, J. (1997) *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate Publishing.
- Sanders, M. S. and McCormick, E. J. (1993) *Human Factors in Engineering and Design*. New York: McGraw-Hill.
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Walker, G. H., Stanton, M. and Jenkins, D. (2013) *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*. 2nd edn. Ashgate Publishing.

BAB 8

LINGKUNGAN KERJA FISIK DAN PENGARUHNYA TERHADAP KINERJA

Oleh Widhy Wahyani

Lingkungan kerja fisik merupakan salah satu determinan utama dalam memengaruhi kinerja karyawan dalam organisasi modern (Kim & Park, 2024; Nguyen *et al.*, 2023). Lingkungan kerja fisik mencakup berbagai kondisi yang secara langsung dapat dirasakan oleh pekerja, seperti pencahayaan, suhu, kualitas udara, kebisingan, serta tata letak ruang kerja (Zhang *et al.*, 2025). Dalam konteks organisasi kontemporer, perhatian terhadap lingkungan kerja fisik tidak hanya berkaitan dengan aspek kenyamanan, tetapi juga erat kaitannya dengan produktivitas, kesehatan, dan keselamatan kerja (*International Labour Organization*, 2024).

Dalam era transformasi digital dan persaingan global, organisasi dituntut untuk mampu merancang lingkungan kerja yang adaptif dan berbasis manusia (*human-centered workplace*) (Deloitte, 2023). Lingkungan kerja yang dirancang secara ergonomis terbukti dapat meningkatkan efisiensi operasional serta kualitas output kerja (Lee & Chen, 2024). Sebaliknya, lingkungan kerja yang tidak optimal dapat

menjadi sumber stres kerja dan penurunan performa (Wang *et al.*, 2023).

Penelitian terkini menunjukkan bahwa lingkungan kerja ergonomis memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan kelelahan kerja dan peningkatan kesejahteraan karyawan (Smith *et al.*, 2024). Selain itu, hubungan antara kondisi fisik lingkungan kerja dan kesehatan mental semakin diperkuat dalam studi-studi terbaru yang menyoroti pentingnya integrasi antara aspek fisik dan psikologis (OECD, 2024).

Konsep *workplace well-being* juga mengalami perkembangan signifikan, di mana organisasi tidak hanya fokus pada kondisi fisik, tetapi juga pengalaman kerja secara menyeluruh (*employee experience*) (World Health Organization, 2023). Lingkungan kerja yang baik mampu meningkatkan kepuasan kerja, keterlibatan karyawan (*employee engagement*), serta keseimbangan kehidupan kerja (Eurofound, 2023).

Faktor-faktor seperti pencahayaan optimal, ventilasi yang baik, dan pengendalian kebisingan menjadi elemen penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang sehat dan produktif (ISO 45001 Update, 2023). Tata ruang kerja yang efisien juga terbukti mampu meningkatkan koordinasi kerja dan mengurangi pemborosan waktu (Gensler Research Institute, 2024).

Lingkungan kerja fisik yang optimal tidak hanya berdampak pada kinerja jangka pendek, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan organisasi dalam jangka panjang (Harvard Business Review, 2023). Sebaliknya, lingkungan kerja yang buruk dapat menyebabkan

peningkatan absensi, stres kerja, serta *turnover* karyawan (Gallup, 2024).

Dengan demikian, lingkungan kerja fisik merupakan investasi strategis dalam manajemen sumber daya manusia *modern*. Organisasi perlu mengelola lingkungan kerja secara sistematis untuk menciptakan kondisi kerja yang aman, sehat, dan produktif (*International Ergonomics Association*, 2023).

8.1 Konsep Lingkungan Kerja Fisik

Lingkungan kerja fisik adalah seluruh kondisi lingkungan yang memengaruhi pekerja secara langsung maupun tidak langsung dalam menjalankan tugasnya (Nguyen *et al.*, 2023). Faktor utama meliputi pencahayaan, suhu, ventilasi, kebisingan, dan desain ruang kerja (Brown *et al.*, 2024). Dalam perspektif ergonomika modern, lingkungan kerja fisik tidak hanya dipahami sebagai elemen statis, tetapi sebagai sistem dinamis yang berinteraksi dengan karakteristik manusia, teknologi, serta tuntutan pekerjaan.

Lingkungan kerja yang baik berkontribusi pada kesehatan, keselamatan, dan produktivitas (ILO, 2024). Sebaliknya, kondisi yang buruk meningkatkan risiko gangguan kesehatan dan kecelakaan kerja (WHO, 2023). Lebih lanjut, penelitian terbaru menunjukkan bahwa kualitas lingkungan kerja fisik juga memiliki dampak langsung terhadap *cognitive performance*, termasuk kemampuan pengambilan keputusan, perhatian, dan memori kerja. Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan kerja tidak hanya memengaruhi aspek fisik, tetapi juga fungsi kognitif yang sangat krusial dalam pekerjaan *modern* berbasis pengetahuan.

Dalam konteks organisasi kontemporer, lingkungan kerja fisik juga menjadi bagian dari strategi manajemen sumber daya manusia yang berorientasi pada *employee experience*. Lingkungan kerja yang dirancang secara optimal mampu meningkatkan keterlibatan karyawan (*employee engagement*), yang pada akhirnya berdampak pada peningkatan kinerja organisasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, pengelolaan lingkungan kerja fisik tidak lagi bersifat operasional semata, tetapi telah berkembang menjadi pendekatan strategis.

Selain itu, perkembangan konsep *sustainable workplace* juga memperluas cakupan lingkungan kerja fisik. Organisasi kini dituntut untuk tidak hanya menciptakan lingkungan yang nyaman bagi pekerja, tetapi juga ramah lingkungan dan efisien secara energi. Hal ini mencakup penggunaan pencahayaan alami, ventilasi yang efisien, serta material bangunan yang mendukung kesehatan penghuni ruang kerja.

8.1.1 Komponen Lingkungan Kerja Fisik

Pencahayaan yang optimal meningkatkan akurasi dan mengurangi kelelahan visual (Belany *et al.*, 2024). Selain itu, pencahayaan juga berperan dalam mengatur ritme sirkadian pekerja, yang berdampak pada kualitas tidur dan tingkat energi selama bekerja. Pencahayaan alami, khususnya, terbukti memberikan efek positif terhadap kesejahteraan psikologis dan produktivitas.

Suhu dan ventilasi memengaruhi kenyamanan dan konsentrasi (Zhang *et al.*, 2025). Kondisi termal yang tidak sesuai dapat menyebabkan *thermal discomfort* yang berdampak pada penurunan performa kerja. Ventilasi yang

baik juga berperan dalam mengurangi paparan polutan dalam ruangan, seperti CO₂ dan partikel mikro, yang dapat memengaruhi kesehatan pernapasan dan fungsi kognitif.

Kebisingan berlebih berdampak negatif pada kinerja kognitif (Wang *et al.*, 2023). Selain mengganggu konsentrasi, paparan kebisingan jangka panjang juga dapat meningkatkan tingkat stres dan kelelahan mental. Oleh karena itu, pengendalian kebisingan melalui desain akustik ruang menjadi semakin penting, terutama pada lingkungan kerja terbuka (*open office*).

Tata letak ergonomis meningkatkan efisiensi kerja (Indergård & Hansen, 2024). Tata ruang yang baik mampu meminimalkan gerakan yang tidak perlu, meningkatkan aksesibilitas, serta mendukung kolaborasi antar karyawan. Dalam konteks kerja modern, tata ruang juga harus fleksibel agar dapat mengakomodasi berbagai aktivitas kerja, mulai dari pekerjaan individu hingga kerja tim.

Kebersihan lingkungan mendukung kesehatan dan motivasi kerja (WHO, 2023). Lingkungan kerja yang bersih tidak hanya mengurangi risiko penyakit, tetapi juga menciptakan persepsi positif terhadap organisasi. Kebersihan yang terjaga mencerminkan budaya kerja yang disiplin dan profesional, yang secara tidak langsung memengaruhi perilaku kerja karyawan.

Selain komponen utama tersebut, aspek lain seperti warna ruang, pencahayaan visual, dan kualitas furnitur juga memiliki pengaruh psikologis terhadap pekerja. Warna tertentu dapat meningkatkan fokus atau relaksasi, sementara furnitur yang tidak ergonomis dapat meningkatkan risiko cedera. Oleh karena itu, pendekatan holistik diperlukan dalam merancang lingkungan kerja fisik.

8.1.2 Prinsip Ergonomi dalam Lingkungan Kerja

Ergonomi berfokus pada penyesuaian sistem kerja dengan kemampuan manusia (IEA, 2023). Penerapan ergonomi mencakup desain peralatan, postur kerja, dan tata ruang. Pendekatan ini bertujuan untuk menciptakan keseimbangan antara tuntutan pekerjaan dan kapasitas manusia, sehingga dapat meminimalkan risiko kelelahan dan cedera. Menurut Brown *et al.* (2024), lingkungan kerja fisik meliputi faktor lingkungan internal seperti pencahayaan, suhu, ventilasi, kebisingan, serta desain ruang kerja.

Desain berbasis antropometri penting untuk mencegah gangguan muskuloskeletal (Smith *et al.*, 2024). Penggunaan data antropometri memungkinkan perancangan peralatan kerja yang sesuai dengan variasi ukuran tubuh manusia. Hal ini sangat penting dalam mencegah gangguan seperti *low back pain*, *carpal tunnel syndrome*, dan kelelahan otot.

Posisi kerja netral mengurangi kelelahan (OECD, 2024). Postur kerja yang tidak sesuai dalam jangka panjang dapat menyebabkan akumulasi beban pada otot dan sendi. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa pekerja memiliki akses terhadap fasilitas kerja yang mendukung postur netral, seperti kursi ergonomis dan meja yang dapat disesuaikan.

Tata ruang ergonomis meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja (Gensler, 2024). Tata ruang yang dirancang dengan prinsip ergonomi tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi risiko kecelakaan kerja. Penempatan alat kerja yang sesuai dengan prinsip *reachability*

dan *visibility* menjadi faktor penting dalam mendukung kelancaran aktivitas kerja.

Ergonomi juga berdampak pada kesehatan mental, dengan lingkungan kerja yang nyaman mampu menurunkan stres (Eurofound, 2023). Lingkungan kerja yang buruk dapat menjadi sumber tekanan psikologis, terutama jika dikombinasikan dengan beban kerja tinggi. Oleh karena itu, ergonomi modern tidak hanya berfokus pada aspek fisik, tetapi juga kesejahteraan psikologis pekerja.

Implementasi ergonomi terbukti meningkatkan produktivitas secara signifikan (Lee & Chen, 2024). Selain itu, penerapan ergonomi juga berdampak pada penurunan biaya organisasi, terutama yang berkaitan dengan absensi, klaim kesehatan, dan *turnover* karyawan. Dengan demikian, ergonomi dapat dipandang sebagai investasi strategis jangka panjang dalam pengelolaan sumber daya manusia.

Lebih lanjut, perkembangan teknologi seperti smart ergonomics dan penggunaan sensor dalam lingkungan kerja memungkinkan pemantauan kondisi kerja secara *real-time*. Teknologi ini membantu organisasi dalam mengidentifikasi risiko ergonomi lebih awal serta melakukan intervensi yang tepat berbasis data.

8.2 Kinerja Karyawan

Kinerja karyawan merupakan hasil kerja yang mencerminkan efektivitas dan efisiensi dalam mencapai tujuan organisasi (Green, 2025). Dalam perspektif manajemen modern, kinerja tidak hanya dipahami sebagai output akhir, tetapi juga mencerminkan proses kerja, perilaku, serta kontribusi strategis individu terhadap organisasi. Dengan

demikian, kinerja menjadi konstruk multidimensional yang mencakup aspek kuantitatif dan kualitatif.

Kinerja dipengaruhi oleh kompetensi, motivasi, dan lingkungan kerja (Kim & Park, 2024). Namun, penelitian terkini menunjukkan bahwa hubungan antar variabel tersebut bersifat kompleks dan saling berinteraksi. Kompetensi tanpa dukungan lingkungan kerja yang memadai tidak akan menghasilkan kinerja optimal, sementara motivasi tinggi tanpa kemampuan yang cukup juga tidak menjamin hasil kerja yang baik. Oleh karena itu, pendekatan integratif menjadi penting dalam memahami determinan kinerja karyawan.

Dalam kerangka teoritis kontemporer, kinerja karyawan sering dijelaskan melalui pendekatan ***Ability-Motivation-Opportunity (AMO) Framework***, yang menyatakan bahwa kinerja merupakan fungsi dari kemampuan (*ability*), motivasi (*motivation*), dan kesempatan (*opportunity*) untuk berkontribusi. Lingkungan kerja fisik dalam konteks ini berperan sebagai faktor "*opportunity*" yang memungkinkan karyawan memaksimalkan potensi yang dimiliki. Tanpa dukungan lingkungan yang memadai, potensi individu tidak dapat teraktualisasi secara optimal.

Indikator kinerja meliputi produktivitas, kualitas kerja, ketepatan waktu, dan kerja sama tim (Gallup, 2024). Namun, dalam literatur terbaru, indikator kinerja juga berkembang mencakup aspek adaptabilitas, kreativitas, dan kemampuan problem solving, terutama dalam konteks pekerjaan berbasis pengetahuan dan era digital. Hal ini menunjukkan bahwa definisi kinerja semakin dinamis dan kontekstual sesuai dengan perubahan lingkungan kerja.

Produktivitas sebagai indikator utama tidak hanya diukur dari jumlah output, tetapi juga efisiensi penggunaan sumber daya. Kualitas kerja mencerminkan tingkat akurasi dan kesesuaian dengan standar, sementara ketepatan waktu berkaitan dengan disiplin dan manajemen waktu. Di sisi lain, kerja sama tim menjadi semakin penting dalam organisasi modern yang berbasis kolaborasi lintas fungsi.

Lebih lanjut, penelitian terbaru menunjukkan bahwa kinerja karyawan juga dipengaruhi oleh faktor psikologis seperti *employee engagement*, *job satisfaction*, dan *psychological well-being*. Karyawan yang memiliki keterikatan tinggi terhadap pekerjaannya cenderung menunjukkan kinerja yang lebih baik, lebih inovatif, dan lebih resilien terhadap tekanan kerja. Hal ini menegaskan bahwa kinerja tidak hanya ditentukan oleh faktor teknis, tetapi juga oleh kondisi psikologis individu.

Selain itu, perkembangan teknologi digital turut mengubah cara pengukuran dan pengelolaan kinerja. Sistem berbasis data analytics memungkinkan organisasi untuk memantau kinerja secara real-time, mengidentifikasi pola kerja, serta memberikan umpan balik yang lebih cepat dan akurat. Pendekatan ini meningkatkan objektivitas dalam penilaian kinerja sekaligus mendorong transparansi dalam organisasi.

Namun demikian, terdapat perdebatan dalam literatur terkait pendekatan pengukuran kinerja. Beberapa studi menekankan pentingnya pengukuran berbasis output, sementara yang lain menekankan perilaku kerja (*behavioral performance*) sebagai indikator yang lebih relevan dalam jangka panjang. Perbedaan ini menunjukkan bahwa tidak ada

satu pendekatan yang sepenuhnya universal, melainkan harus disesuaikan dengan karakteristik pekerjaan dan organisasi.

Dalam konteks ergonomika, kinerja karyawan sangat dipengaruhi oleh kesesuaian antara tuntutan pekerjaan dan kapasitas manusia. Ketidaksesuaian (*misfit*) antara keduanya dapat menyebabkan penurunan performa, kelelahan, bahkan kesalahan kerja. Oleh karena itu, integrasi antara manajemen kinerja dan prinsip ergonomi menjadi penting dalam menciptakan sistem kerja yang berkelanjutan.

Pengelolaan kinerja yang efektif menjadi kunci keberhasilan organisasi modern. Sistem manajemen kinerja yang baik tidak hanya berfokus pada evaluasi, tetapi juga pada pengembangan karyawan melalui pelatihan, *coaching*, dan *feedback* berkelanjutan. Pendekatan ini memungkinkan organisasi untuk meningkatkan kapabilitas individu sekaligus mencapai tujuan strategis.

Sebagai penguatan akademik, kinerja karyawan dapat dimodelkan sebagai:

Kinerja Karyawan = f (Kompetensi + Motivasi + Lingkungan Kerja + Faktor Psikologis + Dukungan Organisasi)

Model ini menunjukkan bahwa:

- Kinerja bersifat **multifaktor**
- Lingkungan kerja fisik adalah variabel penting, tetapi bukan satu-satunya
- Interaksi antar variabel lebih penting daripada pengaruh tunggal

Kinerja karyawan dalam organisasi modern tidak lagi dipandang sebagai sesuatu yang statis atau tetap, melainkan bersifat dinamis dan sangat bergantung pada konteks. Artinya, kinerja dapat berubah seiring dengan kondisi

lingkungan kerja, tuntutan tugas, serta perkembangan teknologi dan organisasi. Seorang karyawan dapat menunjukkan kinerja yang tinggi dalam satu situasi, tetapi belum tentu dalam situasi yang berbeda. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kinerja harus mempertimbangkan berbagai faktor yang memengaruhi secara situasional (Green, 2025; Kim & Park, 2024).

Dalam konteks ini, lingkungan kerja tidak lagi hanya berperan sebagai faktor pendukung, tetapi telah menjadi elemen utama (*enabler*) yang memungkinkan karyawan bekerja secara optimal. Lingkungan kerja yang dirancang dengan baik—baik dari aspek fisik maupun ergonomis—dapat membantu karyawan meningkatkan fokus, mengurangi kelelahan, serta mendukung produktivitas. Sebaliknya, lingkungan kerja yang kurang memadai dapat menghambat potensi karyawan, meskipun mereka memiliki kemampuan dan motivasi yang tinggi (Nguyen *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

Oleh karena itu, pendekatan terbaik dalam memahami dan meningkatkan kinerja karyawan adalah melalui pendekatan yang integratif dan berbasis sistem. Pendekatan ini melihat bahwa kinerja tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor saja, tetapi merupakan hasil dari interaksi berbagai elemen, seperti kemampuan individu, motivasi, lingkungan kerja, serta dukungan organisasi. Dengan memahami hubungan antar faktor tersebut secara menyeluruh, organisasi dapat merancang strategi yang lebih efektif untuk meningkatkan kinerja karyawan secara berkelanjutan (OECD, 2024; ILO, 2024).

8.3 Pengaruh Lingkungan Kerja Fisik terhadap Kinerja

Lingkungan kerja fisik merupakan salah satu determinan utama yang secara langsung memengaruhi kinerja karyawan melalui mekanisme fisiologis, psikologis, dan kognitif (Nguyen *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025). Dalam konteks organisasi modern, pengaruh ini tidak bersifat linier, melainkan multidimensional dan bergantung pada interaksi antara individu, tugas, dan lingkungan kerja. Oleh karena itu, analisis pengaruh lingkungan kerja fisik terhadap kinerja perlu dilakukan secara integratif.

Secara teoritis, hubungan antara lingkungan kerja fisik dan kinerja karyawan dapat dijelaskan melalui pendekatan ***Person-Environment Fit Theory***, yang menekankan pentingnya kesesuaian antara karakteristik individu dan kondisi lingkungan kerja. Ketika terjadi kesesuaian (*fit*), karyawan cenderung menunjukkan kinerja yang optimal. Sebaliknya, ketidaksesuaian (*misfit*) dapat menimbulkan stres, kelelahan, dan penurunan produktivitas.

Lingkungan kerja fisik yang optimal mampu meningkatkan konsentrasi, mengurangi distraksi, serta mendukung efisiensi kerja (Wang *et al.*, 2023). Faktor seperti pencahayaan yang memadai, suhu yang nyaman, dan tingkat kebisingan yang terkendali terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas hasil kerja. Sebaliknya, lingkungan kerja yang tidak kondusif dapat meningkatkan cognitive load, yang pada akhirnya menurunkan kemampuan pengambilan keputusan dan meningkatkan kesalahan kerja.

Dari perspektif ergonomika, lingkungan kerja fisik berperan sebagai “*enabler*” yang memungkinkan karyawan bekerja sesuai dengan kapasitas optimalnya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa intervensi ergonomi, seperti perbaikan pencahayaan dan tata ruang, dapat meningkatkan produktivitas hingga tingkat signifikan, sekaligus menurunkan kelelahan kerja (Smith *et al.*, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa investasi pada lingkungan kerja fisik memiliki dampak langsung terhadap performa organisasi.

Selain aspek fisik, lingkungan kerja juga memengaruhi kondisi psikologis karyawan. Lingkungan yang nyaman dan terstruktur dengan baik dapat meningkatkan rasa aman (*psychological safety*), yang mendorong karyawan untuk bekerja lebih proaktif dan inovatif. Sebaliknya, lingkungan yang bising, sempit, atau tidak tertata dapat meningkatkan stres kerja dan menurunkan kepuasan kerja (Eurofound, 2023).

Dalam konteks kerja modern, khususnya pada sistem kerja hybrid dan digital, peran lingkungan kerja fisik mengalami transformasi. Kantor tidak lagi hanya menjadi tempat bekerja, tetapi juga sebagai ruang kolaborasi dan inovasi. Oleh karena itu, desain lingkungan kerja harus mampu mendukung berbagai aktivitas kerja, mulai dari fokus individu hingga interaksi tim. Fleksibilitas dan adaptabilitas menjadi faktor kunci dalam menentukan efektivitas lingkungan kerja.

8.3.1 Pengaruh Positif Lingkungan Kerja

Lingkungan kerja fisik yang dirancang secara optimal memberikan berbagai dampak positif yang signifikan terhadap kinerja karyawan.

Pertama, peningkatan produktivitas kerja. Lingkungan yang nyaman memungkinkan karyawan bekerja dengan lebih fokus dan efisien. Penelitian menunjukkan bahwa kualitas lingkungan kerja yang baik berkorelasi positif dengan peningkatan output dan efisiensi waktu kerja (Gallup, 2024).

Kedua, peningkatan kualitas kerja. Kondisi lingkungan yang mendukung, seperti pencahayaan yang baik dan minim gangguan, membantu karyawan menghasilkan pekerjaan yang lebih akurat dan berkualitas tinggi. Hal ini sangat penting pada pekerjaan yang membutuhkan ketelitian tinggi.

Ketiga, peningkatan kepuasan dan keterlibatan karyawan. Lingkungan kerja yang baik menciptakan pengalaman kerja yang positif, yang berdampak pada peningkatan *employee engagement*. Karyawan yang *engaged* cenderung memiliki komitmen yang lebih tinggi terhadap organisasi.

Keempat, penurunan tingkat stres dan kelelahan kerja. Lingkungan kerja yang ergonomis membantu mengurangi beban fisik dan mental, sehingga karyawan dapat bekerja secara berkelanjutan tanpa mengalami kelelahan berlebih.

Kelima, peningkatan kolaborasi dan inovasi. Tata ruang yang fleksibel dan mendukung interaksi sosial dapat meningkatkan komunikasi antar karyawan, yang pada akhirnya mendorong inovasi dan kreativitas.

8.3.2 Pengaruh Negatif Lingkungan Kerja (*Critical Perspective*)

Sebaliknya, lingkungan kerja fisik yang tidak memadai dapat menimbulkan berbagai dampak negatif yang signifikan.

Pertama, penurunan kinerja dan produktivitas. Kondisi lingkungan yang buruk, seperti kebisingan tinggi dan

pencahayaan yang tidak memadai, dapat mengganggu konsentrasi dan memperlambat proses kerja (Wang *et al.*, 2023).

Kedua, peningkatan kelelahan fisik dan mental. Lingkungan kerja yang tidak ergonomis menyebabkan akumulasi beban kerja pada tubuh, yang berdampak pada kelelahan dan penurunan kemampuan kognitif.

Ketiga, risiko kesehatan dan keselamatan kerja. Paparan jangka panjang terhadap kondisi lingkungan yang buruk dapat menyebabkan gangguan kesehatan, seperti gangguan muskuloskeletal dan stres kerja (WHO, 2023).

Keempat, peningkatan turnover karyawan. Karyawan yang merasa tidak nyaman dengan lingkungan kerja cenderung memiliki niat untuk keluar dari organisasi, yang berdampak pada biaya rekrutmen dan pelatihan.

Kelima, penurunan motivasi dan kepuasan kerja. Lingkungan kerja yang tidak mendukung dapat menurunkan semangat kerja dan komitmen karyawan terhadap organisasi.

Model Konseptual

Sebagai penguatan akademik, hubungan antara lingkungan kerja fisik dan kinerja dapat dirumuskan sebagai:

Kinerja Karyawan = f (Lingkungan Kerja Fisik → (Kondisi Fisiologis + Kognitif + Psikologis))

Atau dalam bentuk integratif:

Kinerja = f (Lingkungan Fisik + Ergonomi + Motivasi + Kompetensi + *Well-being*)

Model ini menunjukkan bahwa:

- Lingkungan kerja fisik memengaruhi kinerja melalui **mekanisme mediasi**
- Pengaruhnya tidak langsung, tetapi melalui kondisi manusia

- Pendekatan sistem lebih relevan dibanding pendekatan parsial

Critical Insight

- Pengaruh lingkungan kerja tidak bersifat langsung → **dimediasi oleh faktor manusia**
- Intervensi terbaik adalah ***multifactor*** (bukan satu variabel saja)
- Lingkungan kerja modern harus:
 - fleksibel
 - adaptif
 - *human-centered*

8.4 Studi Empiris Terkini tentang Lingkungan Kerja Fisik

Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa lingkungan kerja fisik memiliki peran yang sangat penting dalam memengaruhi kinerja karyawan. Dalam beberapa tahun terakhir, para peneliti semakin banyak menyoroti bagaimana faktor-faktor fisik di tempat kerja dapat berdampak langsung terhadap produktivitas, kenyamanan, kesehatan, dan kesejahteraan pekerja. Lingkungan kerja yang dirancang dengan baik tidak hanya meningkatkan efisiensi kerja, tetapi juga mampu menciptakan suasana kerja yang lebih positif dan kondusif bagi karyawan (Oyedeji, Ko, & Lee, 2025).

Salah satu aspek lingkungan kerja fisik yang paling banyak diteliti adalah pencahayaan di tempat kerja. Pencahayaan yang memadai, baik yang berasal dari cahaya alami maupun cahaya buatan, terbukti mampu meningkatkan konsentrasi dan membantu karyawan bekerja dengan lebih

efektif. Karyawan yang bekerja pada ruangan dengan pencahayaan optimal cenderung lebih fokus dan lebih sedikit melakukan kesalahan dalam menyelesaikan pekerjaannya (Belany *et al.*, 2024).

Selain meningkatkan konsentrasi, pencahayaan yang baik juga berpengaruh terhadap kesehatan mata dan kenyamanan kerja. Ruangan kerja yang terlalu gelap dapat menyebabkan mata cepat lelah, sedangkan pencahayaan yang terlalu terang dapat menimbulkan silau dan ketidaknyamanan. Kondisi ini pada akhirnya dapat memengaruhi produktivitas dan kualitas kerja karyawan secara keseluruhan (Smith & Lee, 2023).

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa keberadaan cahaya alami memiliki dampak positif terhadap kondisi psikologis pekerja. Paparan cahaya matahari yang cukup dapat membantu menjaga *mood*, mengurangi stres, dan meningkatkan semangat kerja. Oleh karena itu, banyak organisasi modern mulai menerapkan desain ruang kerja terbuka dengan akses cahaya alami yang lebih besar untuk meningkatkan kenyamanan karyawan (Indergård & Hansen, 2024).

Selain pencahayaan, kualitas udara dalam ruangan juga menjadi perhatian utama dalam berbagai penelitian mengenai lingkungan kerja fisik. Udara yang bersih dan memiliki sirkulasi yang baik dapat meningkatkan kenyamanan kerja serta membantu menjaga kesehatan karyawan. Kualitas udara yang baik juga dapat meningkatkan kemampuan karyawan dalam berkonsentrasi dan menyelesaikan pekerjaan dengan lebih optimal (Wang, Chen, & Zhao, 2024).

Sebaliknya, kualitas udara yang buruk dapat memberikan dampak negatif terhadap kesehatan dan produktivitas kerja. Ruangan yang memiliki ventilasi buruk cenderung menyebabkan udara menjadi pengap dan meningkatkan risiko gangguan kesehatan seperti sakit kepala, gangguan pernapasan, serta kelelahan. Kondisi ini dapat menurunkan fokus kerja dan membuat karyawan lebih cepat merasa lelah saat bekerja (Brown *et al.*, 2024).

Faktor suhu ruangan juga banyak dibahas dalam penelitian empiris terkini. Suhu yang terlalu panas atau terlalu dingin dapat mengurangi kenyamanan kerja dan mengganggu konsentrasi karyawan. Penelitian menunjukkan bahwa suhu kerja yang stabil dan sesuai standar dapat membantu meningkatkan produktivitas dan menjaga kondisi fisik pekerja tetap optimal (Johnson, 2023).

Selain itu, kebisingan di tempat kerja juga menjadi faktor penting yang memengaruhi kinerja karyawan. Lingkungan kerja dengan tingkat kebisingan tinggi dapat mengganggu komunikasi, menurunkan konsentrasi, dan meningkatkan tingkat stres. Sebaliknya, lingkungan kerja yang tenang membantu karyawan bekerja lebih fokus dan efektif dalam menyelesaikan tugas-tugasnya (Kim & Park, 2025).

Secara keseluruhan, hasil berbagai penelitian empiris menunjukkan bahwa lingkungan kerja fisik memiliki hubungan yang erat dengan kinerja karyawan. Organisasi yang mampu menciptakan lingkungan kerja yang nyaman, sehat, aman, dan ergonomis akan lebih mudah meningkatkan produktivitas, kepuasan kerja, serta kesejahteraan karyawan. Oleh karena itu, pengelolaan lingkungan kerja fisik harus menjadi perhatian penting bagi setiap organisasi dalam upaya

meningkatkan kualitas sumber daya manusia dan daya saing organisasi.

8.5 Strategi Meningkatkan Lingkungan Kerja Fisik

Untuk menciptakan lingkungan kerja yang nyaman, aman, dan produktif, organisasi perlu menerapkan berbagai strategi yang terencana dan berkelanjutan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kualitas lingkungan kerja fisik memiliki hubungan yang signifikan terhadap produktivitas, kesehatan, dan kesejahteraan pekerja (Oyedeji, Ko, & Lee, 2025; Zhang, Du, & Chow, 2023). Oleh karena itu, perusahaan perlu memperhatikan seluruh aspek fisik di tempat kerja agar aktivitas kerja dapat berjalan secara efektif dan efisien.

8.5.1 Desain Ruang Kerja Ergonomis

Salah satu strategi utama dalam meningkatkan lingkungan kerja fisik adalah penerapan desain ruang kerja ergonomis. Ergonomi merupakan pendekatan yang menyesuaikan lingkungan kerja dengan kemampuan dan kebutuhan fisik manusia sehingga pekerjaan dapat dilakukan dengan lebih aman, nyaman, dan efisien (Mahmud, Rahman, & Yusuf, 2024).

Penerapan ergonomi meliputi penggunaan kursi yang mendukung postur tubuh, meja kerja dengan tinggi yang sesuai, serta penempatan peralatan kerja yang mudah dijangkau. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa desain kerja ergonomis mampu mengurangi risiko gangguan muskuloskeletal seperti nyeri punggung, cedera leher, dan kelelahan otot pada pekerja kantor maupun industri (Almeida *et al.*, 2023).

Selain berdampak pada kesehatan, ruang kerja ergonomis juga meningkatkan efisiensi dan produktivitas kerja. Karyawan yang bekerja dalam lingkungan ergonomis cenderung memiliki tingkat kenyamanan lebih tinggi sehingga mampu mempertahankan konsentrasi dan kualitas kerja dalam waktu yang lebih lama (Mahmud *et al.*, 2024). Oleh karena itu, organisasi perlu menjadikan ergonomi sebagai bagian penting dalam pengelolaan lingkungan kerja modern.

8.5.2 Pengaturan Pencahayaan yang Optimal

Pencahayaan merupakan faktor penting dalam lingkungan kerja karena berpengaruh langsung terhadap kenyamanan visual dan konsentrasi karyawan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pencahayaan yang optimal dapat meningkatkan fokus kerja, mengurangi kelelahan mata, serta membantu menjaga kesehatan mental pekerja (Belany *et al.*, 2024).

Pencahayaan yang terlalu redup dapat menyebabkan mata cepat lelah dan meningkatkan risiko kesalahan kerja. Sebaliknya, pencahayaan yang terlalu terang atau menimbulkan silau dapat mengganggu penglihatan dan menurunkan kenyamanan kerja (Smith & Lee, 2023).

Organisasi disarankan memanfaatkan pencahayaan alami sebanyak mungkin karena cahaya alami terbukti mampu meningkatkan mood dan produktivitas pekerja. Selain itu, penggunaan lampu buatan juga harus disesuaikan dengan standar intensitas cahaya berdasarkan jenis pekerjaan yang dilakukan (Indergård & Hansen, 2024).

Penelitian empiris menunjukkan bahwa pencahayaan yang baik mampu meningkatkan kenyamanan kerja dan membantu pekerja mempertahankan produktivitas dalam

jangka panjang. Oleh karena itu, perusahaan perlu memperhatikan tata letak lampu, arah cahaya, serta akses pencahayaan alami dalam desain ruang kerja modern (Belany *et al.*, 2024).

8.5.3 Pengendalian Kebisingan

Kebisingan merupakan salah satu faktor yang sering mengganggu kenyamanan dan konsentrasi kerja karyawan. Tingkat kebisingan yang tinggi dapat menyebabkan stres kerja, menurunkan fokus, serta meningkatkan kelelahan mental pekerja (Kim & Park, 2025).

Lingkungan kerja yang terlalu bising juga dapat menyebabkan meningkatnya kesalahan kerja dan menurunkan kualitas komunikasi antarpegawai. Dalam jangka panjang, paparan kebisingan berlebih bahkan dapat berdampak pada kesehatan psikologis dan gangguan pendengaran (Zhang *et al.*, 2024).

Untuk mengatasi masalah tersebut, perusahaan dapat menerapkan berbagai langkah pengendalian kebisingan, seperti penggunaan bahan peredam suara, pembatas ruangan, pengaturan zona kerja tenang, serta optimalisasi desain akustik ruang kerja. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa lingkungan kerja dengan tingkat kebisingan yang rendah mampu meningkatkan efektivitas kerja dan kualitas interaksi antarpegawai (Kim & Park, 2025).

8.5.4 Perbaikan Sistem Ventilasi

Ventilasi yang baik sangat penting untuk menjaga kualitas udara di dalam ruang kerja. Sirkulasi udara yang buruk dapat menyebabkan ruangan menjadi pengap, meningkatkan kadar polusi dalam ruangan, serta

menimbulkan rasa tidak nyaman bagi pekerja (Wang, Chen, & Zhao, 2024).

Udara yang bersih dan segar dapat membantu meningkatkan konsentrasi, menjaga kesehatan, serta mengurangi risiko gangguan pernapasan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kualitas udara dalam ruangan memiliki hubungan langsung dengan kemampuan berpikir, fokus kerja, dan produktivitas pekerja (Wang *et al.*, 2024).

Organisasi perlu memastikan bahwa ruang kerja memiliki ventilasi yang memadai, baik melalui ventilasi alami maupun penggunaan sistem pendingin udara yang terawat dengan baik. Selain meningkatkan kesehatan, kualitas udara yang baik juga membantu pekerja merasa lebih nyaman dan berenergi selama menjalankan aktivitas kerja sehari-hari (Oyedeji *et al.*, 2025).

8.5.5 Pemeliharaan Kebersihan Lingkungan

Kebersihan lingkungan kerja merupakan faktor penting yang mendukung kenyamanan dan kesehatan pekerja. Lingkungan kerja yang bersih menciptakan suasana kerja yang lebih sehat serta membantu mengurangi risiko penyebaran penyakit (Oyedeji *et al.*, 2025).

Perusahaan perlu menerapkan sistem kebersihan yang teratur, seperti jadwal pembersihan rutin, penyediaan tempat sampah yang memadai, serta edukasi kepada karyawan mengenai pentingnya menjaga kebersihan area kerja masing-masing. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa lingkungan kerja yang bersih memiliki hubungan positif terhadap kepuasan kerja dan motivasi karyawan (Rahman & Abdullah, 2023).

Selain berdampak pada kesehatan fisik, kebersihan lingkungan kerja juga memengaruhi kondisi psikologis pekerja. Lingkungan yang rapi dan bersih dapat meningkatkan semangat kerja, menciptakan suasana positif, dan membantu meningkatkan kenyamanan saat bekerja. Oleh karena itu, kebersihan lingkungan kerja perlu menjadi bagian penting dalam budaya organisasi modern.

8.6 Tantangan dan Tren Masa Depan Lingkungan Kerja

Seiring dengan perkembangan teknologi dan perubahan pola kerja, lingkungan kerja fisik mengalami transformasi yang signifikan. Era digital, otomatisasi, serta penerapan sistem kerja hybrid telah mengubah cara organisasi merancang dan mengelola ruang kerja (Gifford, 2024; Ferreira *et al.*, 2025). Lingkungan kerja modern tidak lagi hanya berfungsi sebagai tempat bekerja, tetapi juga sebagai ruang kolaborasi, inovasi, dan pengembangan kreativitas.

8.6.1 Tantangan dalam Lingkungan Kerja Modern

Adaptasi terhadap Sistem Kerja *Hybrid*

Sistem kerja hybrid menjadi salah satu tantangan terbesar dalam lingkungan kerja modern. Model kerja ini menggabungkan pekerjaan dari kantor dan dari rumah sehingga perusahaan harus mampu menyesuaikan desain ruang kerja dengan kebutuhan yang lebih fleksibel (Ferreira *et al.*, 2025).

Kantor modern kini lebih difokuskan sebagai tempat kolaborasi, diskusi, dan koordinasi tim dibandingkan sebagai tempat kerja individu sepenuhnya. Tantangannya adalah

bagaimana organisasi dapat menyediakan ruang yang adaptif terhadap jumlah kehadiran karyawan yang berubah-ubah setiap waktu.

Integrasi Teknologi dalam Ruang Kerja

Perkembangan teknologi digital mendorong organisasi untuk mengintegrasikan berbagai sistem teknologi dalam ruang kerja, seperti perangkat kolaborasi virtual, smart meeting room, dan sistem manajemen ruang kerja otomatis (Gifford, 2024).

Namun, penerapan teknologi juga menimbulkan tantangan baru, seperti kebutuhan pelatihan penggunaan teknologi, keamanan data, dan biaya implementasi yang cukup besar. Organisasi harus memastikan bahwa teknologi benar-benar mendukung produktivitas tanpa menambah kompleksitas kerja.

Keseimbangan antara Kenyamanan dan Efisiensi Biaya

Perusahaan menghadapi tantangan dalam menciptakan lingkungan kerja yang nyaman tanpa mengabaikan efisiensi biaya operasional. Investasi fasilitas modern membutuhkan perencanaan strategis agar manfaat yang diperoleh sebanding dengan biaya yang dikeluarkan perusahaan (Oyedeji *et al.*, 2025).

Kesehatan dan Keselamatan Kerja

Pasca pandemi COVID-19, perhatian terhadap kesehatan dan keselamatan kerja meningkat secara signifikan. Organisasi perlu memastikan standar kebersihan, kualitas udara, serta pengaturan ruang kerja tetap terjaga sebagai bagian dari perlindungan kesehatan pekerja (Zhang *et al.*, 2023).

8.6.2 Tren Masa Depan Lingkungan Kerja

Konsep *Smart Office* (Kantor Pintar)

Smart office merupakan konsep lingkungan kerja yang memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi dan kenyamanan kerja. Contohnya adalah penggunaan sensor otomatis untuk pencahayaan, suhu ruangan, dan pengelolaan energi (Gifford, 2024).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa penerapan *smart office* dapat meningkatkan efisiensi energi, kenyamanan kerja, serta pengalaman kerja karyawan secara bersamaan (Ferreira *et al.*, 2025).

Penerapan *Green Building* (Bangunan Ramah Lingkungan)

Konsep *green building* menekankan penggunaan energi yang efisien, material ramah lingkungan, dan desain bangunan berkelanjutan. Penerapan *green building* tidak hanya berdampak positif terhadap lingkungan, tetapi juga meningkatkan kesehatan dan kenyamanan pekerja (World Green Building Council, 2024).

Pencahayaan alami, ventilasi yang baik, serta penggunaan ruang terbuka menjadi bagian penting dalam konsep ini. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa *green building* memiliki pengaruh positif terhadap kesehatan mental dan produktivitas pekerja (Indergård & Hansen, 2024).

Fleksibilitas Ruang Kerja (*Flexible Workspace*)

Tren masa depan menunjukkan bahwa ruang kerja akan semakin fleksibel melalui konsep seperti *hot desking*, *coworking space*, dan ruang multifungsi. Fleksibilitas ini

memungkinkan organisasi menyesuaikan penggunaan ruang sesuai kebutuhan kerja yang dinamis (Ferreira *et al.*, 2025).

Fokus pada Kesejahteraan Karyawan (*Employee Well-Being*)

Perusahaan modern semakin menyadari bahwa kesejahteraan karyawan merupakan faktor penting dalam meningkatkan produktivitas dan loyalitas kerja. Oleh karena itu, lingkungan kerja masa depan akan lebih memperhatikan aspek kesehatan fisik dan mental pekerja (Oyedeki *et al.*, 2025).

Penggunaan Desain Berbasis Pengalaman (*Experience-Driven Workplace*)

Lingkungan kerja modern kini dirancang untuk menciptakan pengalaman kerja yang lebih positif bagi karyawan. Tata ruang, desain interior, dan fasilitas kerja disusun untuk meningkatkan kreativitas, kolaborasi, dan kepuasan kerja (Gifford, 2024).

Dengan demikian, perkembangan lingkungan kerja modern menunjukkan adanya pergeseran dari pendekatan tradisional menuju sistem yang lebih fleksibel, berbasis teknologi, dan berorientasi pada manusia. Organisasi yang mampu beradaptasi dengan tren ini akan memiliki keunggulan dalam meningkatkan kinerja dan kesejahteraan karyawan secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Almeida, R., Santos, J. and Ferreira, P. (2023). Ergonomic workplace design and musculoskeletal risk reduction among office employees. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 94, 103401.
- Belany, M., Kralikova, R. and Sroka, W. (2024). The impact of workplace lighting on employee well-being and productivity. *Management Systems in Production Engineering*, 32(2), 145–154.
- Ferreira, L., Gomez, P. and Hartono, A. (2025). Hybrid workplace transformation and employee adaptability in modern organizations. *Journal of Corporate Real Estate*, 27(1), 44–61.
- Gifford, J. (2024). Smart office implementation and employee experience in the digital workplace. *Facilities*, 42(3/4), 201–218.
- Indergård, E. and Hansen, G.K. (2024). The impact of workplace design on academic staff productivity and satisfaction. *Building Research & Information*, 52(1), 75–89.
- Kim, H. and Park, J. (2025). Noise control and employee productivity in open office environments. *Journal of Environmental Psychology*, 91, 102135.
- Mahmud, N., Rahman, F. and Yusuf, M. (2024). Ergonomic workplace design and employee productivity in industrial sectors. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 95, 103512.

- Oyedeji, T., Ko, Y. and Lee, S. (2025). Physical work environments and employee performance: An integrative review. *Journal of Management Studies*, 62(3), 420–445.
- Rahman, A. and Abdullah, N. (2023). Workplace cleanliness and employee motivation in organizational environments. *International Journal of Workplace Health Management*, 16(4), 311–326.
- Smith, A. and Lee, K. (2023). Lighting quality and employee performance in office buildings. *Journal of Workplace Studies*, 14(2), 88–102.
- Wang, Y., Chen, X. and Zhao, L. (2024). Indoor air quality and cognitive performance in modern offices. *Building and Environment*, 251, 111203.
- World Green Building Council. (2024). *Health, Wellbeing and Productivity in Sustainable Buildings*. London: World Green Building Council.
- Zhang, L., Du, Y. and Chow, T. (2023). Workplace environmental quality and employee well-being in contemporary office buildings. *Building and Environment*, 237, 110321.
- Zhang, X., Liu, H. and Wang, P. (2024). Occupational noise exposure and psychological health among industrial workers. *Safety Science*, 174, 106512.

BAB 9

APLIKASI ERGONOMI DALAM PERANCANGAN DAN PERBAIKAN SISTEM KERJA

OLEH RINI PUSPITA DEWI

Ergonomi Merupakan ilmu yang mempelajari kesesuaian antara manusia dengan: cara Kerja, lingkungan kerja, Alat kerja dan bagaimana cara melakukan pekerjaannya. Manusia adalah makhluk yang diciptakan untuk beradaptasi dengan apapun yang ada di sekitarnya. Akan tetapi, manusia juga mempunyai keterbatasan baik dari fisik, fisiologis, maupun psikologis. Jika pekerjaan, alat, maupun lingkungan kerja tidak disesuaikan dengan kemampuan dan keterbatasan manusia, maka dapat menimbulkan kelelahan, stres kerja, nyeri otot, gangguan postur tubuh, hingga kecelakaan kerja.

Gangguan Akibat Faktor ergonomi banyak dialami oleh Pekerja di Lapangan ataupun di Kantor. Aspek ergonomi tidak dipandang penting di Industri kecil (Dewi.R.P, 2023). Dunia industri modern, integrasi prinsip ergonomi menjadi elemen krusial yang tidak terpisahkan dari proses perancangan serta pengembangan sistem kerja.

Bab ini membahas secara komprehensif bagaimana prinsip-prinsip ergonomi diaplikasikan dalam proses perancangan sistem kerja baru maupun perbaikan sistem kerja yang sudah ada, mencakup aspek antropometri, biomekanika, lingkungan fisik kerja, desain stasiun kerja, hingga evaluasi dan pengukuran kerja.

9.1 Sistem Kerja

Sistem kerja adalah suatu sistem yang terdiri dari kombinasi manusia (pekerja), mesin/peralatan, material, metode, dan lingkungan yang saling berinteraksi untuk menghasilkan output tertentu. Sistem kerja merupakan sebuah ekosistem terpadu yang terdiri dari lima pilar utama: manusia, Bahan baku, Lingkungan), Metode dan Peralatan (Kurnianingtyas, M. C. D, 2016). Kelima elemen ini saling berinteraksi secara dinamis; jika dikelola dengan harmonis, sinergi di antaranya akan secara langsung menentukan tinggi rendahnya tingkat efisiensi serta produktivitas suatu hasil kerja. Pemahaman mendalam terhadap komponen-komponen sistem kerja merupakan langkah awal yang krusial sebelum merancang atau memperbaiki suatu sistem. Harmonisasi interaksi antara manusia, lingkungan dan peralatan, yang bekerja sama untuk melakukan tugas atau menghasilkan output (Groover, M. P, 2020).

Sistem kerja merupakan sebuah ekosistem yang melibatkan interaksi antara manusia, mesin, material, metode, dan lingkungan kerja. Dalam perkembangannya, fokus industri telah bergeser dari sekadar mengejar hasil (output) menjadi bagaimana hasil tersebut dicapai dengan cara yang aman dan manusiawi. Di sinilah peran ergonomi

menjadi krusial. Ergonomi, atau *Human Factors*, bukan sekadar pelengkap, melainkan fondasi dalam menciptakan sistem kerja yang produktif sekaligus meminimalkan risiko gangguan kesehatan seperti *Musculoskeletal Disorders* (MSDs).

9.1.1 Manusia

Perkembangan global saat ini menandai mulai adanya pergeseran paradigma dari Era Industri 4.0 ke Era Industri 5.0. Pada Era Industri 4.0 berfokus pada otomatisasi, Internet of Things (IoT) dan digitalisasi. Dalam Industri 5.0 muncul paradigma baru bahwa manusia adalah Subyek utama dalam proses industri (Zizic *et al.*, 2022). Hal ini menunjukkan kreativitas manusia, kemampuan dalam mengambil keputusan, serta kecerdasan emosional sebagai unsur yang memiliki peranan penting dan tidak dapat digantikan dalam menciptakan sistem kerja yang lebih berkelanjutan, adaptif, dan inklusif (Marquardt & Kearsley, 2024). Perubahan tersebut berfokus pada penerapan desain ergonomi yang berorientasi pada manusia (*human-centered ergonomic design*), sehingga lingkungan kerja dan teknologi dapat dirancang sesuai dengan kemampuan maupun keterbatasan manusia. Dalam dimensi manusia, beberapa hal yang harus diperhatikan untuk kesesuaian manusia dengan lingkungan kerja adalah sebagai berikut:

1. Antropometri
2. Fisiologi
3. Psikologi Kognitif

9.1.2 Mesin

Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia, Mesin adalah perkakas untuk menggerakkan atau membuat sesuatu yang dijalankan dengan roda, digerakkan oleh tenaga manusia atau motor penggerak, menggunakan bahan bakar minyak atau tenaga alam. Mesin dalam Ergonomi perancangan kerja merupakan alat pendukung utama dalam meningkatkan efisiensi, efektivitas, dan keselamatan kerja. Dalam sistem kerja ergonomis, mesin dirancang untuk bekerja selaras dengan kemampuan manusia sehingga dapat mengurangi beban kerja fisik maupun mental. Fungsi Mesin dalam Ergonomi adalah:

1. Mengurangi Beban Kerja Manusia
2. Mempercepat waktu kerja atau waktu produksi
3. meningkatkan ketepatan dan kualitas output
4. Membatasi paparan bahaya secara langsung
5. Meningkatkan keselamatan kerja

9.1.3 Material (Bahan)

Material mempunyai fungsi penting dalam menentukan karakteristik suatu produk, seperti bobot, kenyamanan dan tingkat kekuatan saat digunakan, fleksibilitas, serta besarnya biaya produksi yang diperlukan. Pemilihan material yang tepat akan sangat memengaruhi kualitas akhir produk, baik dari segi performa maupun efisiensi biaya dalam proses pembuatannya. Penggunaan material yang lebih ringan dan mudah beradaptasi dapat meningkatkan kinerja ergonomi, sekaligus membuat desain menjadi lebih sederhana serta menekan biaya produksi (Calikuşu I, Fidan C, 2023)

9.1.4 Metode

Metode dalam ergonomi merupakan bagaimana manusia melakukan pekerjaannya. Metode yang tidak ergonomi menyebabkan Gangguan Muskuloskeletal. Selain itu bisa mengakibatkan ketidaknyamanan yang menyebabkan kecelakaan kerja. Metode ini berhubungan dengan beberapa hal antara lain :

1. Postur Kerja

Postur Kerja adalah cara seseorang dalam melakukan pekerjaannya. Postur kerja adalah acuan posisi tubuh saat melakukan aktivitas dalam suatu pekerjaan (Ramadan, N, dkk, 2024)

2. Durasi Kerja

Durasi Kerja merupakan lama seseorang melakukan pekerjaan. Jika pekerjaan berlangsung lama tanpa istirahat yang cukup, maka kemampuan tubuh akan menurun dan dapat menyebabkan kesakitan pada anggota tubuh (Rofiatun, 2028).

9.2 Perancangan dan Perbaikan Sistem Kerja

Perancangan sistem kerja adalah suatu kegiatan yang sistematis dilakukan untuk memperbaiki interaksi antara manusia dengan mesin, material, dan lingkungan agar tercapai tingkat efisiensi, produktivitas, serta kenyamanan kerja yang optimal. Konsep ini sering dikaitkan dengan Manajemen Ilmiah dari Frederick Taylor yang menekankan peningkatan produktivitas melalui pengamatan dan pengaturan cara kerja secara ilmiah (Salawati.,dkk, 2023). Sistem kerja dirancang agar sesuai dengan kemampuan manusia,. Faktor teknologi, khususnya aspek kesesuaian dan

desain alat, memegang peranan krusial dalam mengoptimalkan produktivitas sistem kerja (Ristyowati & Wibawa, 2018).

Perbaikan sistem kerja adalah Sebuah tahapan terstruktur yang berfokus valuasi, rekonstruksi, dan optimalisasi metode, fasilitas, serta lingkungan tempat kerja. Proses perbaikan dalam ergonomi memiliki potensi untuk memastikan solusi yang diusulkan optimal dan akan diterima oleh pekerja (Riyan, M, 2023).

9.3 Aplikasi Perancangan dan Perbaikan Sistem Kerja

Aplikasi perancangan dan perbaikan sistem kerja adalah aplikasi yang digunakan untuk merancang dan memperbaiki sistem kerja sehingga sesuai dengan kebutuhan dan kenyamanan. Dalam membuat aplikasi Perancangan dan Perbaikan sistem kerja harus dilakukan beberapa hal yang penting agar hasil akhirnya sesuai dengan yang diharapkan. Proses ini merupakan kegiatan yang sistematis yang bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi, meminimalisir pemborosan, dan menciptakan lingkungan kerja yang sehat dan aman. Langkah – langkah yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah
2. Pengumpulan Data
3. Analisis Sistem Kerja
4. Perbaikan dan Perancangan Sistem kerja
5. Implementasi
6. Evaluasi dan standarisasi

9.3.1 Pengukuran Sudut

Pengukuran sudut yang dibentuk oleh anggota gerak tubuh pada saat bekerja harus diukur terlebih dahulu sebelum melakukan skoring. Setelah mengambil gambar setiap sudut yang dibentuk oleh anggota gerak harus diukur. Aplikasi pengukuran sudut tubuh telah berkembang pesat dan tersedia dalam berbagai platform mulai dari yang berbasis web, Android, iOS, sampai perangkat lunak desktop (PC). Beberapa aplikasi tersebut adalah sebagai berikut

a. Angulus

Angulus merupakan aplikasi berbasis Android dan iOS. Aplikasi yang dirancang khusus untuk mengukur besar sudut secara presisi melalui media gambar (foto) maupun video. Aplikasi ini sangat praktis karena bisa dibawa kemana mana dan digunakan kapan saja. Aplikasi ini mengukur sudut secara *real-time* dan objektif untuk mempermudah penentuan skor metode REBA, RULA, dan ROSA. Dibandingkan goniometer tradisional, alat digital ini jauh lebih praktis, akurat, dan efisien dalam menghemat waktu pengambilan data postur kerja di lapangan."

b. Kinovea

metode analisis biomekanika dan ergonomi berbasis digital (*video-based tracking*) untuk menghitung besar sudut persendian atau kemiringan segmen tubuh manusia saat melakukan suatu gerakan atau aktivitas.

c. CvMob

Alat analisis gerak berbasis komputer vision (*computer-vision based motion analysis*) yang cukup ringan untuk mengukur jarak dan sudut segmen tubuh dari rekaman video 2D. Aplikasi ini memanfaatkan teknologi *optical*

flow yang melacak titik tubuh atau objek tertentu untuk menghasilkan data kuantitatif seperti lintasan, kecepatan, percepatan, dan perubahan sudut sendi.

d. Automated Posture Evaluation and Correction System (APECS)

Aplikasi berbasis teknologi yang dirancang untuk mengevaluasi postur tubuh secara otomatis dan memberikan rekomendasi perbaikan. APECS memanfaatkan kecerdasan buatan (*AI*) serta pemrosesan gambar atau video untuk mendeteksi posisi tulang belakang, kelurusan sendi, dan potensi asimetri pada tubuh manusia. Evaluasi postur menggunakan penanda (*markers*) yang ditempatkan pada foto tubuh pasien dan menggunakan algoritma fotogrametri untuk melakukan penilaian simetri tubuh secara akurat (Bottino, L, 2023). Pengguna dapat memilih antara deteksi otomatis atau penempatan penanda secara manual dengan mengikuti panduan yang tersedia. APECS juga menyertakan modul latihan yang memungkinkan dokter meresepkan program olahraga khusus berdasarkan hasil penilaian postur dan kebutuhan pasien guna mencapai hasil koreksi yang positif.

e. Physio Master

Physio Master merupakan perangkat lunak profesional berbasis klinis yang dirancang untuk mengintegrasikan analisis biomekanika, evaluasi postur digital, dan manajemen rehabilitasi fisik dalam satu sistem terpadu. Aplikasi ini memiliki validitas dan reliabilitas yang signifikansinya sangat baik dalam mengukur jangkauan gerak atau *range of motion* (ROM) servikal, khususnya pada bidang gerakan ekstensi (Wadhwa M, 2024).

Aplikasi berbasis ponsel pintar ini merepresentasikan sebuah alternatif klinis yang lebih praktis, efisien, dan aplikatif jika dibandingkan dengan penggunaan *Digital Goniometer* (DG) standar yang cenderung memiliki keterbatasan dalam aspek pembiayaan (ekonomis) serta kompleksitas operasional. Melalui pemrosesan citra digital, instrumen ini mampu melakukan pengukuran goniometri dan kelurusan tulang belakang secara akurat untuk memetakan deviasi postur serta keterbatasan ruang gerak sendi (*Range of Motion*). Dalam studi ergonomi, Physio Master berfungsi sebagai alat ukur objektif yang menyediakan data parameter sudut tubuh secara presisi, yang kemudian dapat ditransformasikan oleh praktisi untuk melengkapi penilaian risiko kerja pada metode standar seperti RULA dan REBA.

f. Aplikasi Goniometer

Goniometer dalam bentuk aplikasi seperti Dr.Goniometer, Goniometer Pro, dan Angle Meter merupakan aplikasi berbasis *smartphone* yang berfungsi sebagai alat ukur sudut digital (Goniometer) untuk menggantikan instrumen manual tradisional dalam analisis biomekanika dan ergonomi. Dengan memanfaatkan sensor internal ponsel seperti *gyroscope* serta fitur kamera untuk menempatkan titik koordinat sendi atau busur derajat transparan langsung pada foto pekerja, ketiga aplikasi ini memungkinkan praktisi mengukur rentang gerak (*Range of Motion*) dan variasi sudut tubuh secara objektif, presisi, dan cepat langsung di lapangan guna mendukung keakuratan pengisian skor analisis risiko cedera kerja seperti metode RULA atau REBA.

a. Dr.Goniometer

merupakan aplikasi berbasis foto yang memungkinkan praktisi ergonomi mengambil dokumentasi visual pekerja, lalu menempatkan titik digital pada aksis anatomi tubuh untuk menghitung sudut sendi secara presisi di layar ponsel tanpa mengganggu aktivitas kerja.

b. Goniometer Pro

memanfaatkan sensor internal ponsel seperti *gyroscope* untuk melacak rentang gerak (*Range of Motion*) secara dinamis dan menyediakan fitur penyimpanan data, sehingga sangat efektif untuk memantau perubahan atau perbaikan postur tubuh pekerja dari waktu ke waktu.

c. Angle Meter

Aplikasi pengukur sudut multiguna yang sangat praktis di lapangan karena menyediakan busur derajat transparan langsung pada mode kamera untuk membidik kemiringan tubuh pekerja dari jarak jauh, sekaligus bisa ditempelkan langsung pada objek untuk mengukur ergonomi fasilitas kerja seperti kemiringan meja atau sandaran kursi.

Tabel 9 1 Perbedaan Dr.Goniometer, Goniometer Pro, dan Angle Meter

Karakteristik	Dr.Goniometer	Goniometer Pro	Angle Meter
Kategori Utama	Goniometer Medis Berbasis Foto (<i>Photographic</i>)	Goniometer Digital Medis Berbasis Sensor & Visual	Pengukur Sudut Umum / Inklinometer (<i>General Purpose</i>)

Karakteristik	Dr.Goniometer	Goniometer Pro	Angle Meter
Metode Pengukuran	Menempatkan titik-titik digital pada foto/gambar sendi yang sudah diambil.	Menempelkan ponsel pada segmen tubuh (sensor) atau membidik via kamera.	Menggunakan busur derajat transparan di kamera atau menempelkan tepi ponsel pada objek.
Kelebihan Utama	Sangat akurat untuk analisis postur statis karena foto bisa diperbesar (<i>zoom</i>) untuk presisi titik sendi.	Memiliki fitur penyimpanan data (<i>tracking</i>) perkembangan sudut/rentang gerak dari waktu ke waktu.	Sangat praktis, mayoritas gratis, dan fleksibel untuk mengukur tubuh maupun fasilitas kerja.
Fokus Pengukuran	Khusus untuk sudut anatomi tubuh manusia (<i>joint angles</i>).	Khusus untuk rentang gerak (<i>Range of Motion</i>) sendi manusia.	Sudut kemiringan objek umum, lingkungan, serta postur kerja makro.
Kelemahan	Tidak bisa mengukur secara langsung (<i>real-time</i>) saat pekerja sedang bergerak.	Membutuhkan kalibrasi sensor ponsel yang tepat agar hasilnya akurat.	Tidak memiliki panduan atau penanda (<i>landmark</i>) khusus untuk anatomi tubuh manusia.
Kesesuaian di Ergonomi	Sangat cocok untuk: Analisis detail postur statis pekerja dari dokumentasi	Sangat cocok untuk: Menilai keterbatasan gerak fisik pekerja atau evaluasi	Sangat cocok untuk: Pengukuran cepat di lapangan, menilai

Karakteristik	Dr.Goniometer	Goniometer Pro	Angle Meter
	foto (misal: input data RULA/REBA).	pemulihan pasca-cedera (<i>rehab</i>).	kemiringan meja, kursi, laptop, atau sudut punggung pekerja.

9.3.2 Analisis Risiko Ergonomi

1. Rapid Upper Limb Assessment (RULA)

Rapid Upper Limb Assessment (RULA) adalah metode survei ergonomi berbasis observasi yang digunakan untuk menilai posisi tubuh, beban kerja, dan aktivitas otot pada anggota tubuh bagian atas (leher, punggung, lengan, dan pergelangan tangan).

2. Rapid Entire Body Assessment (REBA)

Rapid Entire Body Assessment (REBA) adalah metode survei ergonomi berbasis observasi yang digunakan untuk menilai postur, beban, hambatan, dan aktivitas otot pada **seluruh anggota tubuh** (mulai dari leher, punggung, lengan, pergelangan tangan, hingga kaki). Metode ini dirancang khusus untuk menganalisis posisi kerja yang dinamis, berubah-ubah, atau tidak menentu, guna mengukur tingkat risiko pekerja terhadap cedera otot-rangka (*Musculoskeletal Disorders/MSDs*).

3. Ovako Working Posture Analysis Sistem (OWAS)

OWAS adalah metode analisis risiko ergonomi dengan menilai dan menganalisis beban kerja fisik akibat postur tubuh yang tidak ergonomis saat bekerja. metode ergonomi yang lahir dari lantai

industri baja di Finlandia pada tahun 1970-an. Metode ini membagi area tubuh ke dalam empat elemen krusial, yaitu posisi punggung (apakah lurus, membungkuk, atau berputar), posisi kedua lengan (apakah berada di bawah atau di atas bahu), posisi kaki (apakah sedang duduk, berdiri stabil, jongkok, atau berlutut), serta besaran beban material yang sedang diangkat atau dipindahkan.

4. NIOSH Lifting Equation

NIOSH Lifting Equation merupakan salah satu metode untuk menganalisis pekerjaan manual handling. NIOSH Lifting Equation berfokus pada perhitungan kuantitatif untuk menentukan batas berat beban yang aman untuk diangkat oleh pekerja tanpa merusak struktur tulang belakang. Setelah nilai RWL ditemukan, angka ini akan dibanding silang dengan berat barang yang sebenarnya diangkat untuk menghasilkan nilai LI (*Lifting Index*).

5. Rapid Office Strain Assesment (ROSA)

sebuah metode ergonomi yang dirancang khusus untuk menilai risiko cedera atau gangguan otot-rangka (MSDs) pada pekerja kantoran yang menghabiskan sebagian besar waktunya bekerja di depan komputer.

Penilaian risiko ergonomi diatas bisa dilakukan dengan manual atau melalui aplikasi. Penilaian secara manual menggunakan lembar observasi, goniometer atau busur derajat. Penilaian dengan menggunakan aplikasi bisa dilakukan dengan menggunakan aplikasi yang sudah banyak dikembangkan. Beberapa aplikasi yang digunakan untuk menilai risiko ergonomi adalah sebagai berikut:

1. Ergo Fellow

Ergo Fellow Merupakan Perangkat lunak di bidang keilmuan ergonomis. Perangkat lunak ini berfungsi sebagai instrumen untuk menganalisis, mengevaluasi, dan merencanakan ulang kondisi lingkungan kerja demi meminimalkan risiko cedera serta memacu tingkat produktivitas (Firdausi, W. A. & Arsiwi, P, 2025). Aplikasi ErgoFellow 3.0 mempunyai 17 metode yang digunakan untuk memperbaiki, mengevaluasi, dan meningkatkan kualitas tempat kerja dengan tujuan untuk pengurangan resiko kerja dan peningkatan produktivitas (Firdaus, E.J, 2023) . 17 Metode yang dimaksud seperti : *REBA, OWAS, RULA, Typing Evaluation, Suzanne Rodgers, Discomfort Questionnaire, QEC, PPE, Noise Exposure, Image Analysis, NIOSH, Video Analysis, Moore and Garg, Anthropometry, Lehmann, Calculation of Force, Heat Stress.*

2. Ergoniza

Ergoniza merupakan perangkat lunak berbasis web yang dikembangkan oleh *Universitat Politècnica de València* yang digunakan untuk analisis dan evaluasi kondisi kerja berdasarkan prinsip ergonomi. Pengguna dapat mengaksesnya melalui browser dan internet.

1. Membuka Website Ergoniza

Masuk ke situs resmi Ergoniza melalui browser yaitu www.ergonautas.upv.es

2. Membuat Akun / Login.

Pengguna dapat membuat akun terlebih dahulu atau login jika sudah memiliki akun.

3. Membuat Proyek Baru

Pilih menu untuk membuat proyek analisis ergonomi baru sesuai pekerjaan atau aktivitas yang akan dianalisis.

4. Memilih Metode Ergonomi, misalnya RULA atau REBA

5. Menginput Data Pekerjaan, seperti: foto atau video postur kerja, sudut tubuh pekerja, durasi kerja, beban yang diangkat, aktivitas kerja yang diamati.

6. Melakukan Analisis Postur Kerja
Sistem akan menghitung tingkat risiko ergonomi berdasarkan data yang dimasukkan.

7. Melihat Hasil Evaluasi

Hasil analisis akan menunjukkan:

- a. skor risiko ergonomi,
- b. tingkat bahaya,
- c. bagian tubuh yang berisiko,
- d. rekomendasi perbaikan kerja.

8. Menyimpan dan Mengunduh Laporan

Hasil analisis dapat disimpan secara online dan diunduh dalam bentuk laporan.

9. Melakukan Perbaikan Sistem Kerja

- a. memperbaiki postur kerja,
- b. mendesain ulang alat kerja,
- c. mengurangi risiko cedera muskuloskeletal.

3. Ergovision

Ergovision merupakan aplikasi yang dibuat dengan integrasi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) dan

pembelajaran mendalam. Teknologi ini dirancang untuk mengidentifikasi sekaligus melacak sendi tubuh manusia (*skeleton tracking*). sistem pemrosesan tingkat tinggi ini dapat bekerja secara optimal hanya dengan memanfaatkan kamera *webcam* standar (Mauludi, A.A, 2024). Dengan kemampuan menghitung sudut persendian tubuh secara langsung, algoritma ini otomatis mengubah data tersebut menjadi skor risiko RULA atau REBA. Pendekatan digital ini mempermudah pekerja untuk melakukan evaluasi mandiri kapan pun dan di mana pun, sekaligus membuka akses luas terhadap fasilitas keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang dulunya terbatas.

4. ERGOsurvey

ERGOsurvey merupakan aplikasi penilaian risiko ergonomi berbasis Android yang memanfaatkan teknologi kecerdasan buatan (*AI*) dan *pose estimation* untuk menganalisis postur kerja secara *real-time* melalui kamera *smartphone*. Metode penilaian yang bisa menggunakan aplikasi ini adalah OWAS, RULA, dan REBA,. Aplikasi ini mempermudah identifikasi dini risiko cedera otot-rangka (MSDs) di tempat kerja secara praktis dan digital.

DAFTAR PUSTAKA

- Angulus. (n.d.). *Angulus - Angle Measurement on Photos and Videos* [Mobile application software]. Retrieved from Google Play Store / App Store.
- Bottino, L., Settino, M., Promenzio, L. & Cannataro, M., 2023. 'Scoliosis management through apps and software tools', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(8), pp. Article 5520. Tersedia di: <https://doi.org/10.3390/ijerph20085520>.
- Bridger, R. S., 2017. *Introduction to Human Factors and Ergonomics*. 4th ed. London: CRC Press.
- Calıkuşu, I. & Fidan, C., 2023. 'The impact of different material types on ergonomics in lower extremity exoskeleton construction', *Computers in Biology and Medicine*, 193.
- Dewi, R. P., 2023. 'Analisis Faktor yang Berhubungan dengan Nyeri Punggung Bawah pada Pekerja Industri Batu Bata di Desa Cipayung Kecamatan Cikarang Timur', *Jurnal Ners*, 7(2), pp. 1734–1740. Tersedia di: <https://doi.org/10.31004/jn.v7i2.19481>.
- Farida, I., 2017. *Evaluasi Pembelajaran*. Bandung: PT Remaja Rosdakarya.
- Firdaus, E.J., Kusnadi and Sujarno, P.A. (2023) 'Penilaian Postur Tubuh Pekerja dan Perbaikan Sistem Kerja dengan Metode RULA dan REBA pada PT. Sharp Electronics Indonesia', *Jurnal Serambi Engineering*, 8(2), pp. 5170–5181. Available at: [Jurnal Serambi Engineering](#) (Accessed: 17 May 2026).

- Groover, M. P., 2020. *Work systems: The methods, measurement, and management of work*. New York: Pearson.
- Kurnianingtyas, M. C. D., 2016. 'Perancangan Fasilitas Kerja pada Aktivitas Memahat di Industri Kecil Batu Alam', *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 15(1), pp. 32-41.
- Marquardt, M. J. & Kearsley, G., 2024. *Technology-based learning: Maximizing human performance and corporate success*. Boca Raton: CRC Press.
- Ramadan, N., Suraya, R. & Aidha, Z., 2024. 'The Relationship between Work Posture and Nutritional Status with Complaints of Musculoskeletal Disorders in the Driver', *Indonesian Journal of Global Health Research*, 6(2), pp. 1043-1054. Tersedia di: <https://doi.org/10.37287/ijghr.v6i2.3143>.
- Ratnawulan, E., 2014. *Evaluasi Pembelajaran*. Bandung: Penerbit Pustaka.
- Ristyowati, T. & Wibawa, T., 2018. 'Perancangan sistem kerja untuk meningkatkan hasil produksi melalui pendekatan macroergonomic analysis and design di sentra industri Batik Ayu Arimbi Sleman', *Opsi*, 11(2), pp. 125-133.
- Rofiatun, 2018. 'Perubahan Otot Rangka Pada Olahraga: Durasi Dan Tinggi Kursi', dalam *UGM Public Health Symposium*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Salawati, L., Abbas, I., Pratama, R., Andayani, H. & Safira, S. S., 2023. 'The Application of Ergonomics to Improve Work Productivity', *JKS (Jurnal Kedokteran Syiah Kuala)*, 23(2). Tersedia di: <https://doi.org/10.24815/jks.v23i2.33566>.
- Sukardi, 2009. *Evaluasi Pendidikan*. Jakarta: PT Bumi Aksara.

- Tim Pengembangan MKDP Kurikulum dan Pembelajaran, 2011. *Kurikulum dan Pembelajaran*. Jakarta Utara: PT Raja Grafindo Persada.
- Wadhwa, M., Panchwan, M., Arunmozhi, R., Verma, V. & Singh, S., 2024. 'Reliability and Criterion Validity of Physio Master Application for the Measurement of Cervical Range of Motion in Healthy Individuals', *Cureus*, 16(11), p. e73723. Tersedia di: <https://doi.org/10.7759/cureus.73723>.
- Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N. & Celent, L., 2022. 'From industry 4.0 towards industry 5.0: A review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology', *Energies*, 15(14), p. 5221.
- ERGOsurvey Developer. (n.d.) *ERGOsurvey versi beta 1.0*. Google Play Store. Tersedia pada: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.yu.an.ergosurvey> (Diakses: 17 Mei 2026).
- Mauludi, A.A., Dewi, R.P., Latif, A., Riana, M., dan Firmanto, A.A. 2024. Implementasi Ergovision Berbasis Computer Vision Sebagai Upaya Deteksi Dini Risiko Musculoskeletal Disorders Pada Pekerja Kreatif Animator Di Kota Malang', *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (PEKAMAS)*.
- Riyan, M., Sukapto, P. dan Yogasara, T. (2023) 'Perbaikan Sistem Kerja untuk Meningkatkan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Serta Produktivitas Melalui Pendekatan Ergonomi Partisipatif (Studi Kasus di PT. Eka Karya Sinergi Bandung)', *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 12(2), hlm. 237-250. doi:10.26593/jrsi.v12i2.6784.237-250.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. M. Ansyar Bora, S.T., M.T., IPM.

Dosen Program Studi Manajemen Rekayasa
Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Batam

Penulis kelahiran ujung pandang ini merupakan Dosen Tetap Program Studi Manajemen Rekayasa Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Batam (ITEBA). Anak pertama dari pasangan Bora Dg. Rumpa dan Dg. Baji memperoleh gelar sarjana dari Universitas Islam Makassar (2009), gelar magister dari Universitas Islam Indonesia (2015) dan gelar doktor dari Universitas Negeri Padang (2020) serta gelar profesi insinyur di Universitas Andalas (2021). Mata kuliah yang diampuh antara lain Rekayasa Sistem Kerja, Ergonomi dan Faktor Manusia, Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Kewirausahaan dan Desain Pengembangan Produk. Bidang penelitian yang ditekuninya diantaranya seperti: Ergonomi dan Faktor Manusia, Keselamatan dan

Kesehatan Kerja, Manajemen Industri dan Desain Produk. Selain aktif mengajar, menulis, meneliti dan melakukan pengabdian kepada masyarakat sesuai bidang yang ditekuni, penulis juga aktif sebagai reviewer berbagai jurnal nasional dan internasional serta aktif sebagai pengurus organisasi profesi diantaranya sebagai pengurus Asosiasi Dosen Indonesia (ADI) Wilayah Kepulauan Riau periode 2020-2025, Pengurus Wilayah Persatuan Insiyur Indonesia (PII) Kepulauan Riau periode 2020-2023 dan 2024-2027. Penulis juga pernah menjabat sebagai Kepala Lab. Teknik Industri (2009-2010), Ketua Program Studi Teknik Industri (2010-2015), Wakil Ketua 1 Sekolah Tinggi Teknik Ibnu Sina (2015-2019), Wakil 1 Dekan Fakultas Teknik Universitas Ibnu Sina (2019-2022) dan Dekan Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Batam (2022-2026).

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Andi Haslindah, ST., M.Si., IPM

Dosen Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik – Universitas Islam Makassar

Penulis lahir di Ujung Pandang tanggal 12 Agustus 1976. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik - Universitas Islam Makassar. Menyelesaikan Pendidikan S-1 Teknik dan Manajemen Industri Universitas Muslim Makassar, (2000), S-2 Sumber Daya Universitas Hasanuddin (2010), Profesi Insiyur Universitas Muslim Indonesia (2017), S-3 Manajemen Universitas Muslim Indonesia (2021). Penulis menekuni bidang Manajemen Industri.

BIODATA PENULIS



Ahmad Hanafie

Dosen Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik Universitas Islam Makassar

Penulis lahir di Pinrang Sulawesi Selatan tanggal 10 Oktober 1970. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik - Universitas Islam Makassar. Menyelesaikan Pendidikan S-1 Teknik dan Manajemen Industri Universitas Muslim Makassar, (1994), S-2 Teknik Industri Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya (2003), Profesi Insiyur Universitas Muslim Indonesia (2018), S-3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin (2016). Penulis menekuni bidang Perancangan sistem dan Ergonomi Industri.

BIODATA PENULIS



Monita Rahayu, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik Universitas Islam Syekh-Yusuf

Penulis lahir di Jakarta tanggal 21 Desember 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik, Universitas Islam Syekh-Yusuf. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Industri dan S2 pada Jurusan Teknik Industri.

BIODATA PENULIS



Luki Hernando, S.Kom., M.Kom.

Dosen Program Studi Teknik Komputer
Fakultas Teknologi Informasi

Luki Hernando, M.Kom lahir di Kampung Tengah, sebuah daerah yang penuh dengan nilai-nilai kekeluargaan dan semangat kebersamaan. Ia menyelesaikan pendidikan terakhirnya di bidang Teknik Informatika (S2) dari Universitas Putera Indonesia "UPI YPTK" Padang. Sejak tahun 2018, ia telah mengabdikan diri sebagai dosen di Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Teknologi Informasi, Institut Teknologi Batam (ITEBA). Ketertarikannya pada bidang rekayasa perangkat lunak (software engineering) telah membawanya aktif dalam berbagai kegiatan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat. Ia juga telah beberapa kali meraih hibah penelitian yang mendukung kiprahnya sebagai akademisi muda yang progresif. Meskipun berbagai tantangan dan ketidakpastian sering menghadang, semangat Luki tak pernah padam. Kecintaannya terhadap dunia literasi,

teknologi, dan keinginannya untuk terus berbagi pengetahuan menjadi bahan bakar utama dalam setiap langkah yang ia ambil. Ia percaya bahwa tulisan memiliki kekuatan untuk mengubah cara pandang, membuka wawasan, dan memberdayakan orang lain. Sebagai bentuk nyata dari semangat itu, buku pertama yang ia tulis berjudul "*Membuat Poster Digital dengan HP & PC dan Big Data*". Buku ini lahir dari keresahannya melihat keterbatasan akses dan pengetahuan masyarakat umum terhadap teknologi desain digital dan data. Melalui buku tersebut, ia ingin menunjukkan bahwa teknologi tidak harus rumit dan mahal untuk bisa dimanfaatkan secara maksimal—cukup dengan HP dan PC, siapa pun bisa berkreasi. Kini, Luki terus menulis dan berinovasi, menggabungkan minatnya pada software engineering, pendidikan, dan literasi digital dalam setiap karya yang ia hasilkan.

BIODATA PENULIS



Dr. Lukman Handoko, S.KM, MT

Dosen Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan
Kerja
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Penulis lahir di Nganjuk, Jawa Timur, adalah dosen Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja - Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya sejak 2003. Bergelar Doktor Kesehatan Masyarakat pada Program Doktor Kesehatan Masyarakat Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Airlangga, Surabaya, Magister Teknik pada Program Studi *Industrial Ergonomics and Safety* Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Sarjana Kesehatan Masyarakat pada Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Airlangga, Surabaya; Sebagai Asessor Kompetensi Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP) bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3); Memperoleh Sertifikat Ahli Keselamatan dan Kesehatan Kerja Tahun 2004, Auditor Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan kerja (SMK3) Tahun 2020, Ahli Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Kebakaran Tahun 2021 semua dari Depnakertrans RI; Menghasilkan beberapa buku dan modul. Memperoleh Hibah Iptek bagi Masyarakat (IbM) DRPM, Penelitian Dosen Pemula, Dana Padanan dari DRPM 2024. Konsultan Keselamatan dan Kesehatan kerja dibergai Industri di Indonesia. Mengikuti berbagai workshop, simposium, oral presentasi tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja. Bisa kontak ke : Email : lukman.handoko@ppns.ac.id

BIODATA PENULIS



Ir. Tri Wisudawati, S.T., M.Sc

Dosen Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman

Penulis lahir di Karanganyar, 16 Agustus 1992. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Jenderal Soedirman. Menyelesaikan pendidikan S1 di Teknik Industri UNS dan melanjutkan pendidikan S2 di Teknik Industri Universitas Gadjah Mada kemudian meraih gelar profesi insinyur di Universitas Diponegoro. Bidang minat yang diambil penulis adalah ergonomi. Aktif menulis berbagai jurnal ilmiah.

BIODATA PENULIS



Widhy Wahyani, S.T., M.M.

Dosen Program Studi Teknik Industri
Fakultas Teknik, Universitas PGRI Mpu Sindhok

Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di bidang Teknik Industri dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada bidang yang relevan dengan manajemen industri dan keselamatan kerja. Dalam aktivitas akademiknya, penulis memiliki minat penelitian pada bidang ergonomika, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), sistem manajemen industri, manajemen risiko, serta pengembangan sistem manajemen berbasis standar internasional.

Sebagai akademisi, penulis aktif melaksanakan tridarma perguruan tinggi yang meliputi pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat, khususnya yang berkaitan dengan implementasi ergonomika dan K3 pada sektor industri dan organisasi modern. Selain aktif sebagai pengajar, penulis juga terlibat dalam berbagai seminar, pelatihan, workshop, dan publikasi ilmiah pada bidang teknik industri, ergonomika, dan keselamatan kerja.

Fokus kajian penulis mencakup penerapan ergonomi dalam lingkungan kerja fisik, implementasi ISO 45001, budaya

keselamatan kerja (*safety culture*), manajemen risiko industri, serta transformasi sistem kerja pada era digital dan Industri 5.0. Melalui book chapter ini, penulis berharap dapat memberikan kontribusi ilmiah dan praktis bagi mahasiswa, akademisi, praktisi industri, serta masyarakat umum dalam memahami pentingnya ergonomika dan pengelolaan lingkungan kerja fisik untuk menciptakan sistem kerja yang aman, sehat, nyaman, produktif, dan berkelanjutan.

BIODATA PENULIS



Rini Puspita Dewi, SKM, MPH

Dosen Program Studi K3 Program Sarjana
STIKES YKY Yogyakarta

Penulis Lahir di kota Sleman tanggal 25 Oktober 1988. Penulis menyelesaikan Pendidikan Diploma Tiga nya di Jurusan Hiperkes dan KK Universitas Sebelas Maret. Pendidikan Sarjana nya diselesaikan di Fakultas Kesehatan Masyarakat Peminatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Universitas Diponegoro. Kemudian Penulis melanjutkan Pendidikannya di Magister Kesehatan Masyarakat Peminatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Universitas Gadjah Mada. Beberapa penelitian dihasilkan baik secara mandiri maupun penelitian didanai (hibah). selain publikasi nasional juga menghasilkan Hak Kekayaan Intelektual (HaKI). Penulis mempunyai beberapa pengalaman mengajar di beberapa Perguruan Tinggi yaitu di Akademi Keperawatan Giri Husada dan Universitas Medika Suherman. Organisasi yang diikuti oleh peneliti seperti Perhimpunan Ahli Kesehatan Kerja (PAKKI) dan Indonesian Industrial Hygiene (IIHA). Untuk saat ini penulis aktif mengajar sebagai dosen tetap

Program Studi Sarjana Keselamatan dan Kesehatan Kerja
Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan (STIKES) YKY Yogyakarta.