

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semen merupakan material utama dalam pembangunan infrastruktur yang mendukung perkembangan ekonomi dan sosial. Industri semen memainkan peran penting dalam menciptakan struktur yang kuat, tahan lama, dan efisien, serta menyediakan lapangan kerja yang signifikan. Keberlanjutan pasokan semen sangat penting di Indonesia untuk proyek infrastruktur besar, seperti jalan tol, pelabuhan, dan perumahan, yang menjadi kunci penggerak pembangunan nasional.

Proses produksi semen melibatkan tahapan penghancuran, penggilingan, pembakaran, dan pengemasan bahan baku, yang menghasilkan emisi debu dalam jumlah signifikan. Debu ini dapat mempengaruhi kualitas lingkungan kerja dan berisiko bagi kesehatan pekerja. Debu industri semen, yang terdiri dari partikel halus seperti silika kristalin dan kalsium oksida, dapat menyebabkan gangguan kesehatan serius, termasuk gangguan fungsi paru (Smith et al., 2022). Paparan jangka panjang terhadap debu semen meningkatkan risiko penyakit pernapasan lainnya, seperti bronkitis kronis dan penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) (Johnson & Lee, 2023).

Debu merupakan partikel mikroskopis yang dapat berasal dari proses alami maupun aktivitas manusia, dan umumnya dihasilkan dalam berbagai proses industri, termasuk pertambangan, konstruksi, dan manufaktur (WHO, 2021). Paparan debu dapat membuat manusia tidak nyaman ataupun terganggu, bahkan dapat menimbulkan dampak kesehatan. Debu berukuran kecil berpotensi menimbulkan gangguan fungsi paru pada pekerja. Partikel dengan ukuran kurang dari $1\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}) dapat mencapai alveolus, sementara partikel ultra halus dengan diameter kurang dari $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{PM}_{0.1}$) memiliki kemampuan untuk menembus dinding alveoli dan masuk ke dalam sirkulasi darah. Leikauf et al. (2020) menjelaskan bahwa partikel ultra halus dapat memicu inflamasi sistemik dan stres oksidatif yang berkontribusi terhadap

penurunan fungsi paru. Sementara itu, Wang et al. (2020) dalam tinjauan sistematis dan meta-analisisnya menyatakan bahwa paparan jangka panjang terhadap partikel ultra halus meningkatkan risiko penyakit saluran pernapasan secara signifikan.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa debu yang terhirup oleh pekerja dapat menyebabkan gangguan fungsi paru. Debu halus dari semen yang masuk ke paru-paru saat bernapas dapat mencapai alveoli, menyebabkan penurunan kadar oksigen dalam darah, sehingga menurunkan kapasitas paru dan meningkatkan risiko gangguan pernapasan. Studi di India oleh Kumar et al. (2023) menemukan bahwa pekerja informal yang terpapar debu semen mengalami penurunan signifikan pada fungsi paru, termasuk penurunan nilai FEV_1 , serta peningkatan keluhan respirasi kronis. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Nasri et al. (2023) di Indonesia, yang menunjukkan bahwa paparan $PM_{2.5}$ di industri fiber-semen berhubungan dengan gangguan paru berupa pola restriktif, obstruktif, maupun campuran. Selain itu, Khadijah et al. (2020) melaporkan bahwa pekerja pabrik semen non-perokok memiliki nilai FEV_1 yang lebih rendah dibandingkan kelompok kontrol, dengan prevalensi tinggi gangguan fungsi paru akibat akumulasi debu semen di saluran pernapasan.

Tingginya konsentrasi debu di area produksi dapat meningkatkan kejadian gangguan pernapasan pada pekerja, terutama di lingkungan dengan ventilasi yang buruk. Paparan debu berbahaya, seperti silika bebas dan kalsium oksida, dapat merusak jaringan paru-paru dan meningkatkan kerentanannya terhadap infeksi (Patel et al., 2023). Oleh karena itu, penerapan langkah-langkah mitigasi, seperti penggunaan sistem filtrasi udara yang efektif dan pemakaian alat pelindung diri (APD), menjadi krusial untuk meminimalkan risiko bagi pekerja (Garcia et al., 2024).

Menurut Raza et al. (2021), pekerja di industri semen sering melaporkan gejala seperti batuk kronis, sesak nafas, dan penurunan kapasitas paru-paru akibat paparan debu tersebut. Zhang et al. (2022) menemukan bahwa prevalensi gangguan pernapasan lebih tinggi di area dengan paparan debu tertinggi, seperti penggilingan dan pengemasan. Mitigasi melalui ventilasi yang lebih baik, penggunaan APD, dan

kebijakan lingkungan yang ketat sangat penting untuk mengurangi risiko kesehatan.

Paparan debu semen berhubungan langsung dengan penurunan fungsi paru dan peningkatan risiko penyakit pernapasan (WHO, 2021). WHO (2021) mencatat bahwa debu semen, terutama yang tergolong dalam kategori *total suspended particulates* (TSP), dapat menyebabkan berbagai gangguan fungsi paru, seperti penyakit paru obstruktif kronis (PPOK) dan kanker paru-paru. Patel et al. (2023). menambahkan bahwa debu semen dapat merusak sistem imun tubuh, memperburuk respons imun, dan menurunkan pertahanan alami saluran pernapasan, sehingga meningkatkan risiko gangguan fungsi paru.

Pekerja yang terpapar debu semen dalam jangka panjang beresiko lebih tinggi mengalami gangguan fungsi paru. Studi oleh Li et al. (2020) menunjukkan bahwa debu semen yang mengandung silika dan kalsium karbonat dapat masuk ke sistem pernapasan, menyebabkan penurunan kapasitas paru-paru, serta meningkatkan risiko penyakit pernapasan kronis. Gangguan ini mempengaruhi kualitas hidup pekerja dan dapat menurunkan produktivitas kerja. Penurunan fungsi paru, batuk, dan sesak napas sering ditemukan pada pekerja yang terpapar debu semen, seperti yang dilaporkan oleh Raza et al. (2021).

Penurunan kapasitas paru-paru yang disebabkan oleh paparan debu semen berdampak pada kemampuan pekerja untuk menjalankan tugasnya secara efisien. Anderson et al. (2022) menekankan bahwa penelitian lebih lanjut mengenai hubungan paparan debu semen dengan gangguan fungsi paru di Indonesia, khususnya di industri semen, sangat penting untuk merumuskan kebijakan yang lebih baik serta melindungi kesehatan pekerja dari dampak buruk debu industri semen.

International Labour Organization (ILO, 2023) melaporkan bahwa setiap tahun terdapat sekitar 40.000 kasus baru pneumokoniosis di seluruh dunia. Pneumokoniosis adalah penyakit gangguan fungsi paru yang disebabkan oleh inhalasi debu mineral, seperti silika atau asbes, yang mengakibatkan jaringan parut pada paru-paru. Di antara semua penyakit akibat kerja, 10% hingga 30% merupakan gangguan fungsi paru.

Kematian pekerja akibat penyakit saluran pernapasan menduduki peringkat ketiga dengan jumlah kasus sebesar 21% (Nazira et al., 2022).

Selain itu, *International Labour Organization* (ILO, 2023) melaporkan bahwa setiap tahun lebih dari 250 juta kecelakaan terjadi di tempat kerja, dan lebih dari 160 juta pekerja menderita penyakit akibat paparan bahaya di lingkungan kerja. Dari jumlah tersebut, sekitar 1,2 juta pekerja meninggal akibat kecelakaan dan penyakit terkait pekerjaan. Berdasarkan data BPJS Ketenagakerjaan (2021), terdapat 225.000 kecelakaan kerja dan 53 kasus penyakit akibat kerja pada tahun 2020, beberapa di antaranya disebabkan oleh paparan debu dan faktor lingkungan kerja lainnya.

Berdasarkan data *World Health Organization* (WHO, 2021), gangguan fungsi paru merupakan salah satu penyebab utama kesakitan dan kematian di seluruh dunia. Gangguan fungsi paru menempati peringkat ke-5 sebagai penyebab kematian tertinggi di dunia dan diperkirakan pada tahun 2020 akan menjadi penyebab kematian ke-3. Kasus gangguan fungsi paru akibat paparan debu di lingkungan kerja di Indonesia memiliki prevalensi yang cukup tinggi.

Penyakit gangguan fungsi paru akibat kerja, seperti pneumokoniosis, penyakit paru obstruktif kronik (PPOK), dan asma akibat kerja, tetap menjadi perhatian utama dalam kesehatan dan keselamatan kerja. Faktor risiko utama meliputi paparan debu, gas, dan uap berbahaya di tempat kerja. Oleh karena itu, penting bagi pekerja dan pengusaha untuk menerapkan langkah-langkah pencegahan, seperti penggunaan alat pelindung diri (APD) yang sesuai dan pengendalian paparan di lingkungan kerja (Sari et al., 2022).

Debu merupakan zat kimia padat yang terbentuk akibat kekuatan alami atau mekanis, seperti pengolahan, penghancuran, pelembutan, pengepakan yang cepat, serta peledakan dari benda, baik organik maupun anorganik. Paparan debu, seperti *total suspended particulates* (TSP), dapat menyebabkan penyakit pernapasan serius, termasuk gangguan fungsi paru seperti asma, penyakit paru obstruktif kronis (PPOK), dan fibrosis paru (WHO, 2021). Salah satu sumber utama debu industri adalah debu

semen, yang dapat mengakibatkan gangguan fungsi paru. Faktor yang mempengaruhi kadar debu meliputi ukuran partikel, bentuk, konsentrasi, sifat kimiawi, serta durasi paparan. Selain itu, faktor individu, seperti mekanisme pertahanan paru serta anatomi dan fisiologi saluran pernapasan, juga berperan dalam menentukan dampak paparan debu (Sunaryo & Romadhoni, 2021).

Gangguan fungsi paru akibat paparan debu semen dapat memicu respons pertahanan nonspesifik, seperti batuk, bersin, gangguan transportasi mukosiliar, dan fagositosis oleh makrofag. Otot polos di sekitar saluran napas dapat terangsang sehingga menyebabkan penyempitan. Kondisi ini umumnya terjadi ketika kadar debu melebihi nilai ambang batas (Pratiwi et al., 2021).

Penelitian yang dilakukan oleh Rachmani (2019) menunjukkan bahwa kadar debu semen yang terhirup oleh operator unit *Finish Mill* di PT Semen Indonesia, berdasarkan pengukuran dengan *Personal Dust Sampler*, berkisar antara 1,4665 mg/m³ hingga 26,7151 mg/m³. Hasil ini menunjukkan bahwa debu semen memiliki potensi tinggi untuk terhirup oleh pekerja.

Beberapa penelitian menyoroti dampak paparan debu semen terhadap kesehatan paru pekerja. Liu et al. (2021) dan Li et al. (2020) menemukan hubungan signifikan antara paparan debu semen dan gangguan fungsi paru. Studi di India (Bhatnagar et al., 2022) dan Pakistan (Raza & Raza, 2021) juga menunjukkan peningkatan risiko penyakit paru akibat paparan jangka panjang. Huang et al. (2023) melaporkan bahwa paparan debu di industri semen meningkatkan insiden penyakit paru pada pekerja.

Meskipun telah diterapkan langkah-langkah pengendalian, seperti penggunaan alat pelindung diri (APD) dan sistem ventilasi, survei awal menunjukkan masih adanya keluhan pernapasan pada pekerja yang terpapar debu di area produksi. Konsentrasi partikulat halus (*particulate matter/PM2.5* dan *PM10*) yang tinggi dapat mencapai saluran pernapasan bawah dan berkontribusi terhadap gangguan fungsi paru. Hasanah & Munir (2022) mencatat bahwa beberapa area di PT Semen Tonasa memiliki

kadar debu yang melebihi nilai ambang batas (NAB), yang berdampak pada kesehatan paru pekerja.

Penelitian oleh Salim & Rahman (2021) menunjukkan bahwa paparan rokok dan masa kerja yang panjang meningkatkan risiko pneumokoniosis pada pekerja yang terpapar debu semen. Lestari & Dharma (2020) melaporkan bahwa paparan debu dan paparan rokok secara signifikan meningkatkan risiko gangguan fungsi paru pada pekerja industri semen. Selain itu, Fitriyanti & Fatimura (2019) menemukan bahwa kadar debu di area *packing* mencapai 18,47 mg/m³, jauh melebihi ambang batas aman.

Sebagai industri berbasis bahan baku mineral, proses produksi semen menghasilkan paparan debu yang cukup tinggi, terutama di area penggilingan bahan baku, pembakaran (kiln), dan pengemasan. Survei awal menunjukkan bahwa keluhan pernapasan banyak dialami oleh pekerja yang berada di area produksi, terutama mereka yang terpapar langsung debu semen. Hal ini diduga berkaitan dengan tingginya kadar partikel debu udara seperti PM2.5 dan PM10, yang merupakan partikulat halus berukuran kecil dan mampu masuk hingga ke saluran pernapasan bawah.

Pengukuran kadar debu dilakukan dengan menggunakan alat *Staplex High Volume Air Sampler* di beberapa titik kerja, dan hasil awal menunjukkan bahwa konsentrasi debu di beberapa lokasi kerja melebihi nilai ambang batas (NAB) yang ditetapkan oleh Kementerian Ketenagakerjaan. Partikulat halus ini dapat terakumulasi di saluran pernapasan dan berpotensi menimbulkan gangguan fungsi paru, terutama pada pekerja yang tidak konsisten menggunakan alat pelindung diri (APD) atau memiliki faktor risiko lain seperti paparan rokok dan aktivitas fisik yang rendah. Berdasarkan laporan kesehatan perusahaan, gangguan fungsi paru termasuk dalam 10 besar jenis penyakit yang paling sering dialami oleh pekerja di PT Semen Tonasa.

Hasil survei awal di PT Semen Tonasa, yang berlokasi di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan, menunjukkan bahwa perusahaan ini menempati lahan seluas 1.571 hektare dan merupakan produsen

semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia. Perusahaan ini memiliki 512 pekerja, dengan jam kerja operasional mulai pukul 08.00–16.00 WITA. Rata-rata produksi semen mencapai 7,4 juta ton tiap tahunnya. Gangguan fungsi paru masih menjadi salah satu dari 10 besar penyakit yang sering diderita oleh pekerja di PT Semen Tonasa Pangkep, sebagaimana tercatat dalam laporan kesehatan perusahaan. Survei awal juga menunjukkan bahwa keluhan pernapasan banyak dialami oleh pekerja yang terpapar debu di area produksi. Hal ini diduga berkaitan dengan tingginya konsentrasi partikulat halus (*PM2.5* dan *PM10*), yang dapat terhirup hingga ke saluran pernapasan bawah dan berkontribusi terhadap penurunan fungsi paru.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian dengan judul "Analisis Paparan Debu terhadap Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja di PT Semen Tonasa Tahun 2025."

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

- 1.2.1** Apakah terdapat pengaruh paparan debu (yang diukur berdasarkan kadar debu, lama kerja, dan masa kerja), usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, dan penggunaan alat pelindung diri (APD) terhadap kapasitas paru pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025?
- 1.2.2** Apakah kapasitas paru berpengaruh terhadap gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025?
- 1.2.3** Apakah terdapat pengaruh langsung paparan debu, usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, dan penggunaan APD terhadap gangguan fungsi paru di PT Semen Tonasa tahun 2025?
- 1.2.4** Apakah kapasitas paru memediasi pengaruh paparan debu, usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, dan penggunaan APD terhadap gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara paparan debu dan faktor individu seperti usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, serta penggunaan alat pelindung diri terhadap gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025, dengan kapasitas paru sebagai mediator.

Melalui pendekatan analisis jalur, studi ini menggambarkan pengaruh langsung dan tidak langsung antar variabel secara menyeluruh.

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Menganalisis pengaruh langsung dan tidak langsung paparan debu terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.
2. Menganalisis pengaruh langsung dan tidak langsung usia terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.
3. Menganalisis pengaruh langsung dan tidak langsung status gizi terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.
4. Menganalisis pengaruh langsung dan tidak langsung aktivitas fisik terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.
5. Menganalisis pengaruh langsung dan tidak langsung paparan rokok terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.
6. Menganalisis pengaruh langsung dan tidak langsung penggunaan alat pelindung diri (APD) terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat terhadap :

1.4.1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang kesehatan kerja dan lingkungan, khususnya mengenai hubungan antara paparan debu (kadar debu, lama kerja, masa kerja), usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, penggunaan APD, kapasitas paru, dan gangguan fungsi paru pada pekerja industri semen. Melalui pendekatan analisis jalur, penelitian ini dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang mekanisme pengaruh langsung maupun tidak langsung paparan debu dan faktor-faktor lain terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru sebagai mediator.

1.4.2. Manfaat bagi Instansi (PT Semen Tonasa)

1. Menyediakan data ilmiah terkait kadar paparan debu (kadar debu, lama kerja, masa kerja) di area kerja PT Semen Tonasa, serta faktor-faktor risiko individu seperti usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, dan penggunaan alat pelindung diri (APD) yang berkontribusi terhadap gangguan fungsi paru. Data ini diharapkan menjadi dasar evaluasi dan pengembangan kebijakan Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) yang lebih terarah.
2. Membantu instansi memahami jalur pengaruh langsung dan tidak langsung paparan debu serta faktor individu terhadap gangguan fungsi paru, dengan kapasitas paru sebagai variabel mediasi, sehingga dapat merancang intervensi yang lebih tepat sasaran untuk mencegah risiko gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa.
3. Mendorong penerapan strategi pencegahan gangguan fungsi paru, seperti optimalisasi penggunaan APD, pengendalian paparan debu, pelaksanaan program pemantauan kapasitas paru rutin sebagai upaya deteksi dini dan pencegahan penurunan fungsi paru di lingkungan kerja.

1.4.3. Manfaat bagi Peneliti

1. Memberikan pengalaman dan keterampilan dalam penggunaan analisis jalur (path analysis) untuk mengidentifikasi hubungan kompleks antara variabel independen paparan debu yang meliputi kadar debu, lama kerja, masa kerja, usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok, dan penggunaan alat pelindung diri (APD), kapasitas paru sebagai variabel mediasi, serta gangguan fungsi paru sebagai variabel dependen.
2. Memperdalam pemahaman tentang metode pengukuran kadar debu menggunakan alat *Staplex High Volume Air Sampler* dan evaluasi fungsi paru dengan spirometri (COPD-6) di lingkungan kerja industri semen.
3. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pencegahan gangguan fungsi paru pada pekerja industri semen, serta memberikan kontribusi nyata dalam bidang kesehatan kerja dan keselamatan kerja.

1.5 Tinjauan Umum

1.5.1. Pengertian Kesehatan Kerja

Menurut Blum (1974), derajat kesehatan seseorang atau kelompok dipengaruhi oleh empat faktor utama, yaitu lingkungan, perilaku, pelayanan kesehatan, dan faktor keturunan/genetik. Dalam konteks kesehatan kerja, faktor lingkungan mencakup kondisi fisik, kimia, biologi, dan ergonomi di tempat kerja yang dapat mempengaruhi kesehatan pekerja. Faktor perilaku berkaitan dengan kebiasaan pekerja, seperti penggunaan alat pelindung diri (APD) dan kebiasaan merokok. Faktor pelayanan kesehatan meliputi ketersediaan program pemeriksaan kesehatan, pemantauan fungsi paru, serta tindakan promotif dan preventif di tempat kerja. Sedangkan faktor genetik mencerminkan kerentanan individu terhadap penyakit tertentu yang dapat diperparah oleh paparan di lingkungan kerja.

Pemikiran Blum ini sejalan dengan ILO (2022) dan WHO (2021) yang menekankan bahwa kesehatan kerja adalah upaya menyeluruh untuk memelihara, meningkatkan, dan melindungi kesehatan fisik, mental, dan sosial pekerja. Nasri et

al. (2023) menambahkan bahwa faktor lingkungan industri, khususnya paparan debu respirabel, merupakan determinan dominan dalam menurunkan fungsi paru pekerja. Penelitian lain juga menunjukkan pentingnya perilaku protektif pekerja seperti konsistensi penggunaan APD (Alnawaise et al., 2022; Rathebe, 2023).

Permenaker RI No. 5 Tahun 2018 menegaskan kewajiban pengendalian lingkungan kerja melalui penetapan Nilai Ambang Batas (NAB). Standar internasional seperti yang ditetapkan oleh ACGIH (2024) juga digunakan sebagai acuan pembatasan pajanan partikulat respirabel di industri. Prinsip-prinsip tersebut sejalan dengan teori Blum yang menekankan interaksi antara faktor lingkungan dan perilaku pekerja dalam mempengaruhi status kesehatan.

Selain itu, aspek pelayanan kesehatan dan promotif-preventif mendapat dukungan dari literatur Notoatmodjo (2020) yang menjelaskan bahwa keberhasilan program kesehatan kerja sangat dipengaruhi oleh upaya pendidikan, promosi kesehatan, serta fasilitas pelayanan medis di perusahaan. Moghadam et al. (2017) dan ATS/ERS Guidelines (2019) juga menegaskan pentingnya pemantauan fungsi paru secara rutin melalui pemeriksaan spirometri untuk mendeteksi dini gangguan akibat pajanan debu industri.

1.5.2. Tujuan dan Ruang Lingkup Kesehatan Kerja

Tujuan utama kesehatan kerja adalah melindungi, memelihara, dan meningkatkan derajat kesehatan pekerja. Berdasarkan Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja, ruang lingkup kesehatan kerja mencakup pencegahan penyakit akibat kerja maupun penyakit yang ditimbulkan oleh faktor lingkungan kerja. Aspek lain yang termasuk di dalamnya adalah promosi kesehatan di tempat kerja, penyesuaian antara pekerjaan dan kemampuan pekerja, serta pemantauan kondisi kesehatan tenaga kerja secara berkala.

Konteks industri semen memperlihatkan penerapan ruang lingkup tersebut melalui identifikasi risiko paparan partikel debu respirabel, evaluasi kesehatan paru

pekerja secara rutin, dan penguatan sistem pengendalian risiko. Strategi teknis seperti peningkatan ventilasi lokal, serta kepatuhan terhadap penggunaan alat pelindung diri menjadi bagian dari langkah preventif untuk menjaga kesehatan pekerja dari gangguan fungsi paru.

1.5.3. Prinsip Pencegahan Penyakit Akibat Kerja

Prinsip dasar pencegahan penyakit akibat kerja menekankan pengendalian risiko di sumbernya dengan pendekatan preventif dan promotif yang terdiri dari tiga level: primer (eliminasi atau substitusi bahaya), sekunder (deteksi dini melalui pemeriksaan kesehatan), dan tersier (rehabilitasi pekerja) (Blum, 1974; Notoatmodjo, 2020).

Penelitian menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan perilaku berperan penting dalam kejadian penyakit akibat kerja. Paparan debu respirabel terbukti berhubungan dengan penurunan fungsi paru (Nasri et al., 2023; Alnawaise et al., 2022; Rathebe, 2023). Upaya deteksi dini menggunakan spirometri direkomendasikan oleh Moghadam et al. (2017) dan ATS/ERS Guidelines (2019). Dari sisi regulasi, pengendalian lingkungan diatur dalam Permenaker RI No. 5 Tahun 2018 serta standar internasional ACGIH (2024). Demikian, strategi pencegahan di industri semen perlu dilakukan secara terpadu melalui pengendalian teknis, kepatuhan penggunaan APD, dan program kesehatan kerja berkelanjutan.

Utamanya dalam konteks industri semen, penerapan prinsip ini dapat diimplementasikan melalui pemasangan sistem ventilasi lokal yang efektif, pengawasan kadar debu secara rutin, serta pemberian pelatihan kepada pekerja mengenai bahaya paparan debu. Selain itu, pemantauan kapasitas paru secara berkala menjadi bagian penting dalam mendeteksi gangguan fungsi paru sejak dini, sehingga intervensi yang tepat dapat segera dilakukan (Amponsah-Tawaih et al., 2023).

1.5.4. Prinsip Pencegahan Penyakit Akibat Kerja

Prinsip dasar pencegahan penyakit akibat kerja menekankan pengendalian risiko di sumbernya dengan pendekatan preventif dan promotif yang terdiri dari tiga level: primer (eliminasi atau substitusi bahaya), sekunder (deteksi dini melalui pemeriksaan kesehatan), dan tersier (rehabilitasi pekerja) (Blum, 1974; Notoatmodjo, 2020).

Penelitian menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan perilaku berperan penting dalam kejadian penyakit akibat kerja. Paparan debu respirabel terbukti berhubungan dengan penurunan fungsi paru (Nasri et al., 2023; Alnawaise et al., 2022; Rathebe, 2023). Upaya deteksi dini menggunakan spirometri direkomendasikan oleh Moghadam et al. (2017) dan ATS/ERS Guidelines (2019). Dari sisi regulasi, pengendalian lingkungan diatur dalam Permenaker RI No. 5 Tahun 2018 serta standar internasional ACGIH (2024). Demikian, strategi pencegahan di industri semen perlu dilakukan secara terpadu melalui pengendalian teknis, kepatuhan penggunaan APD, dan program kesehatan kerja berkelanjutan.

Utamanya dalam konteks industri semen, penerapan prinsip ini dapat diimplementasikan melalui pemasangan sistem ventilasi lokal yang efektif, pengawasan kadar debu secara rutin, serta pemberian pelatihan kepada pekerja mengenai bahaya paparan debu. Selain itu, pemantauan kapasitas paru secara berkala menjadi bagian penting dalam mendeteksi gangguan fungsi paru sejak dini, sehingga intervensi yang tepat dapat segera dilakukan (Amponsah-Tawaih et al., 2023).

1.5.5. Konsep Paparan dalam Konteks K3

Konteks Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), paparan (*exposure*) merujuk pada keterpaparan tenaga kerja terhadap agen bahaya fisik, kimia, atau biologis yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan apabila terjadi secara berulang, intensif, dan dalam jangka waktu tertentu (ILO, 2022). Dalam industri

semen, bahaya utama yang menjadi fokus adalah paparan debu semen yang dapat terhirup ke dalam saluran pernapasan.

Partikel debu semen yang bersifat respirabel (berukuran <10 mikron) memiliki kemampuan menembus hingga ke alveoli paru, sehingga dapat menimbulkan gangguan pernapasan seperti iritasi bronkus kronis, bronkitis, hingga penurunan fungsi paru progresif (Rahman et al., 2023). Oleh karena itu, pemantauan pajanan secara kuantitatif menjadi langkah krusial dalam pengendalian risiko.

Penelitian ini mengukur paparan debu menggunakan Staplex High Volume Air Sampler, yaitu alat pengambil sampel udara bertekanan tinggi yang dilengkapi filter untuk menangkap partikel debu di udara lingkungan kerja. Metode ini merujuk pada protokol NIOSH 0500/0600 untuk pengukuran debu total dan debu respirabel, dengan hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan mg/m^3 . Penggunaan Staplex memungkinkan estimasi konsentrasi debu yang akurat dan sah secara ilmiah serta telah digunakan luas dalam penelitian pajanan debu di industri semen.

Penilaian dampak pajanan terhadap fungsi paru menggunakan alat spirometer digital merek Vitalograph, yang memiliki presisi tinggi untuk mengukur parameter fungsi paru, khususnya FEV_1 (*Forced Expiratory Volume in 1 Second*), yaitu volume udara maksimum yang dapat dihembuskan secara paksa dalam satu detik pertama setelah inspirasi maksimal. Penurunan nilai FEV_1 merupakan indikator gangguan obstruktif pada saluran napas yang umum terjadi akibat pajanan partikulat industri (Wang et al., 2021).

Upaya pengendalian paparan debu di lingkungan kerja mengacu pada prinsip Hierarki Pengendalian Bahaya yang mencakup beberapa tahapan strategis. Langkah awal adalah eliminasi, yaitu menghapus sumber debu dari proses kerja. Jika hal ini tidak memungkinkan, dilakukan substitusi dengan mengganti bahan atau proses kerja yang menghasilkan debu lebih sedikit. Tahapan berikutnya adalah penerapan rekayasa teknis, seperti pemasangan sistem ventilasi lokal (Local Exhaust Ventilation/LEV) dan penggunaan sistem filtrasi untuk mengurangi konsentrasi debu

di udara. Selain itu, pengendalian administratif seperti rotasi kerja dan pelatihan keselamatan juga berperan penting dalam menurunkan risiko paparan. Penggunaan alat pelindung diri (APD), misalnya masker respirator N95, menjadi lini terakhir perlindungan jika langkah-langkah sebelumnya belum optimal.

Efektivitas pengendalian tersebut dapat dinilai secara objektif melalui pengukuran konsentrasi debu menggunakan alat Staplex dan pemeriksaan kapasitas paru pekerja menggunakan spirometer Vitalograph. Pendekatan ini memperkuat strategi pencegahan berbasis bukti dan memastikan intervensi yang lebih terarah dalam melindungi kesehatan pekerja industri semen.

1.5.6. Paparan Debu di Lingkungan Kerja

Debu industri merupakan partikel padat mikroskopis yang terbentuk dari proses mekanis seperti penghancuran, penggilingan, atau pemindahan material. Berdasarkan ukurannya, debu dibedakan menjadi debu total dan debu respirabel. Debu respirabel berukuran <10 mikron dan dapat masuk hingga alveoli paru, sehingga lebih berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pernapasan (Choudhary et al., 2022). Di industri semen, debu yang dominan adalah debu silika bebas, kalsium oksida, dan alumina yang tergolong debu anorganik berbahaya (Yusof et al., 2023).

Sumber utama paparan debu dalam industri semen berasal dari proses penggilingan bahan baku, pembakaran klinker, pengemasan semen, serta aktivitas bongkar muat. Selain itu, kondisi lingkungan kerja yang tertutup dengan ventilasi buruk juga meningkatkan konsentrasi debu di udara (Sankoloba & Kekana, 2021). Proses manual dan penggunaan peralatan terbuka memperbesar risiko pekerja terpapar langsung debu respirabel.

Parameter paparan debu dievaluasi berdasarkan tiga parameter utama, yaitu: Kadar debu (mg/m^3), yang diukur menggunakan alat seperti Staplex High Volume Air Sampler.

1. Lama kerja, yaitu durasi jam kerja harian yang menentukan intensitas pajanan harian.

2. Masa kerja, yaitu jumlah tahun bekerja di lingkungan terpapar debu yang mencerminkan pajanan kumulatif.

Ketiga parameter ini penting untuk menilai risiko jangka pendek dan panjang terhadap gangguan fungsi paru (Prajapati et al., 2022). Mekanisme masuknya dan dampak partikel debu terhadap sistem pernapasan yaitu debu respirabel dapat terhirup dan mencapai saluran napas bawah, termasuk bronkiolus terminal dan alveoli. Di sana, partikel akan memicu reaksi inflamasi kronis, menyebabkan perubahan struktural seperti penebalan dinding alveoli dan fibrosis jaringan paru (Rafeemanesh et al., 2023). Jika paparan berlangsung lama tanpa perlindungan, dapat terjadi penurunan nilai FEV_1 dan peningkatan risiko PPOK atau pneumokoniosis.

Nilai Ambang Batas (NAB) Debu Menurut Peraturan Menteri Ketenagakerjaan RI No. 5 Tahun 2018, NAB debu total di lingkungan kerja adalah 10 mg/m^3 , sedangkan NAB untuk debu respirabel adalah 3 mg/m^3 . Sementara itu, ACGIH (2023) merekomendasikan NAB untuk respirable particulate matter (RPM) sebesar 3 mg/m^3 untuk debu inert dan 0.025 mg/m^3 untuk silika kristalin respirabel (Quartz). Melebihi NAB dapat meningkatkan risiko PAK terutama gangguan paru.

1.5.7. Gangguan Fungsi Paru sebagai Penyakit Akibat Kerja (PAK)

Gangguan fungsi paru merupakan kondisi abnormal pada sistem pernapasan yang ditandai dengan penurunan kemampuan ventilasi, baik dalam bentuk obstruksi (hambatan aliran udara) maupun restriksi (penurunan volume paru). Gangguan ini dapat diukur secara objektif melalui pemeriksaan spirometri dan dikategorikan ke dalam dua tipe utama yaitu obstruktif contohnya adalah penyakit paru obstruktif kronik (PPOK) dan bronkitis kronis dan restriktif contohnya adalah fibrosis paru atau gangguan akibat paparan kronis terhadap debu anorganik.

Menurut GOLD (2023), gangguan ventilasi obstruktif ditandai dengan penurunan FEV_1 dengan rasio $<70\%$. Sementara gangguan restriktif biasanya diidentifikasi berdasarkan penurunan kapasitas paru total. Pada konteks pekerjaan,

gangguan fungsi paru diklasifikasikan sebagai Penyakit Akibat Kerja (PAK) jika terbukti berhubungan langsung dengan pajanan bahan berbahaya di lingkungan kerja, seperti debu industri, gas, uap, dan aerosol anorganik (*International Labour Organization* [ILO], 2022).

1.5.8. Gangguan Fungsi Paru sebagai Penyakit Akibat Kerja (PAK)

Paparan jangka panjang terhadap debu respirabel, seperti silika bebas dan partikel semen di industri, berperan penting dalam terjadinya gangguan fungsi paru. Partikel debu berukuran kecil ($<10\ \mu\text{m}$) dapat masuk hingga ke alveoli, memicu inflamasi kronis, remodelling saluran napas, dan fibrosis jaringan paru.

Studi epidemiologis menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar debu semen memiliki risiko lebih tinggi untuk mengalami PPOK, bronkitis kronis, dan fibrosis paru (Alok et al., 2021; Rahman et al., 2023). Salah satu indikator utama kerusakan adalah penurunan FEV_1 yang terjadi secara bertahap dan tidak reversibel, meskipun pajanan dihentikan.

1.5.9. Kapasitas Paru

Kapasitas paru menunjukkan efisiensi paru-paru dalam menampung dan mengeluarkan udara. Salah satu indikator utama yang digunakan dalam penilaian kapasitas paru adalah Forced Expiratory Volume in One Second (FEV_1), yaitu volume udara yang dapat dikeluarkan secara paksa dalam satu detik pertama setelah inspirasi maksimal (GOLD, 2023).

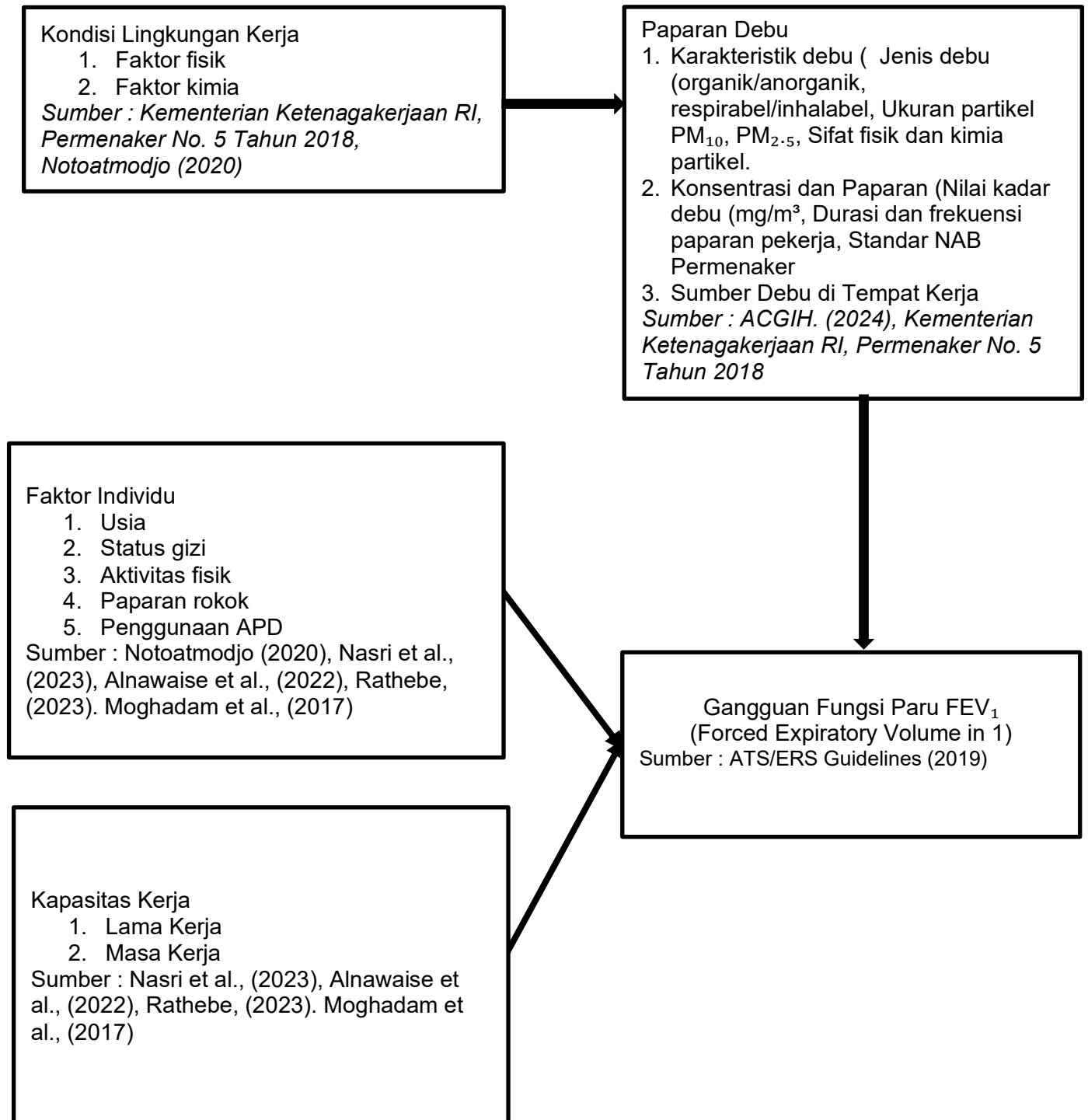
FEV_1 memiliki sensitivitas tinggi dalam mendeteksi gangguan awal pada sistem pernapasan akibat paparan zat iritan, sehingga sangat relevan dalam pemantauan kesehatan kerja di lingkungan berisiko tinggi seperti industri semen. Penurunan nilai FEV_1 secara progresif mencerminkan kerusakan jaringan paru, peradangan kronik, dan penurunan elastisitas saluran napas. Dalam konteks industri semen, FEV_1 terbukti sebagai indikator awal untuk mendeteksi gangguan paru sebelum munculnya gejala klinis (Chen et al., 2020).

Studi di lingkungan industri menunjukkan bahwa penurunan FEV_1 berkorelasi dengan lamanya masa kerja dan kadar pajanan debu yang diterima pekerja (Bakirci et al., 2022). Faktor usia berperan dalam penurunan fungsi paru, di mana nilai FEV_1 (Forced Expiratory Volume in 1 second) secara fisiologis akan menurun seiring bertambahnya usia. Penurunan ini berkaitan dengan proses degeneratif alami pada sistem pernapasan.

Status gizi juga mempengaruhi kesehatan paru; kondisi obesitas dapat membatasi ekspansi paru dan mengurangi efisiensi ventilasi, sementara kekurangan gizi dapat melemahkan otot-otot pernapasan, termasuk diafragma, sehingga mengganggu mekanisme respirasi. Aktivitas fisik memberikan dampak positif terhadap fungsi paru karena individu yang aktif cenderung memiliki kapasitas paru yang lebih baik akibat meningkatnya kekuatan otot pernapasan dan efisiensi ventilatorik. Selain itu, paparan terhadap asap rokok dan partikel debu respirabel terbukti mempercepat penurunan FEV_1 , baik melalui proses inflamasi kronis maupun kerusakan jaringan paru yang bersifat progresif. (Hassan et al., 2022).

Kapasitas paru pada penelitian ini diukur menggunakan spirometri digital Vitalograph, dengan fokus pada parameter FEV_1 saja. Penggunaan FEV_1 sebagai satu-satunya indikator dipilih karena bersifat lebih praktis, sensitif, dan aplikatif dalam pemeriksaan lapangan, khususnya di lingkungan kerja berisiko tinggi seperti industri semen (Wang et al., 2021).

1.6 Kerangka Teori



Gambar 1.1 Kerangka Teori

Kerangka teori dalam penelitian ini dibangun berdasarkan pendekatan multidisipliner yang menggabungkan teori toksikologi lingkungan, fisiologi pernapasan, kesehatan kerja, serta pendekatan epidemiologi analitik melalui analisis jalur. Tujuan utama dari kerangka teori ini adalah untuk menjelaskan keterkaitan antara berbagai variabel risiko, baik yang berasal dari lingkungan kerja maupun pekerja terhadap kapasitas paru dan akhirnya gangguan fungsi paru, yang menjadi fokus utama penelitian ini. Hubungan antar variabel tidak hanya dianalisis secara langsung, namun juga melalui pengaruh mediasi kapasitas paru, guna memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh tentang jalur sebab akibat gangguan fungsi paru akibat paparan debu di lingkungan industri semen.

1.6.1. Paparan Debu

Paparan debu merupakan variabel utama dalam penelitian ini yang dikaji hubungannya dengan gangguan fungsi paru. Debu yang dihasilkan di lingkungan kerja industri semen berasal dari berbagai proses, seperti penggilingan bahan baku, pembakaran klinker, dan pengemasan semen. Paparan ini dapat bersifat kronis, terjadi secara terus-menerus selama jam kerja, dan berisiko menimbulkan dampak kesehatan apabila melebihi Nilai Ambang Batas (NAB) yang ditetapkan, yaitu sebesar 10 mg/m^3 sesuai regulasi nasional. Pada kajian ini, paparan debu diukur secara kumulatif, yaitu dengan mempertimbangkan tiga komponen utama yaitu kadar debu di area kerja (mg/m^3), lama kerja per hari (jam kerja), dan masa kerja atau durasi bertahun-tahun pekerja terpapar di area tersebut.

Pendekatan kumulatif ini digunakan untuk menggambarkan total pajanan yang diterima pekerja dari waktu ke waktu, di mana Paparan Kumulatif = Kadar Debu $\times$ Lama Kerja $\times$ Masa Kerja. Model ini lazim digunakan dalam studi toksikologi kerja untuk menilai risiko kesehatan akibat pajanan jangka panjang.

Pekerja dengan masa kerja yang panjang, jam kerja penuh setiap hari, dan yang bekerja di area dengan kadar debu melebihi NAB, memiliki risiko lebih tinggi mengalami penurunan kapasitas paru. Dampak kesehatan dari pajanan debu tidak selalu bersifat akut, tetapi dapat berkembang perlahan seiring waktu, terutama jika

paparan tidak dikendalikan dengan baik.

Beberapa studi menunjukkan bahwa paparan debu yang tinggi dan berkelanjutan dapat menyebabkan gangguan pernapasan, seperti penurunan volume ekspirasi paksa (FEV_1), dan gejala klinis seperti batuk kronik atau sesak napas. Oleh karena itu, analisis paparan debu secara kumulatif memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk mengidentifikasi hubungan antara kondisi kerja dan gangguan fungsi paru.

1.6.2. Usia

Secara fisiologis, fungsi paru mulai menurun sejak usia 30 tahun akibat perubahan elastisitas alveoli, kekakuan dinding dada, dan penurunan kekuatan otot pernapasan (Bhattacharya et al., 2021). Usia tua juga dikaitkan dengan respons imun yang lebih lemah terhadap polutan, sehingga meningkatkan kerentanan terhadap efek buruk paparan debu. Dalam konteks ini, usia tidak hanya bertindak sebagai variabel risiko, namun juga sebagai faktor yang mempengaruhi seberapa besar dampak paparan debu terhadap kapasitas paru.

1.6.3. Status Gizi (IMT)

Indeks Massa Tubuh (IMT) mencerminkan status gizi pekerja yang dapat berpengaruh terhadap kerja otot respirasi. Gizi buruk menyebabkan kelemahan otot pernapasan, sementara obesitas membatasi ekspansi paru karena lemak di dinding dada dan perut yang menekan sistem pernapasan (Tanaka et al., 2021). Penelitian terbaru dalam jurnal *Nutrients* menyatakan bahwa IMT ideal berkorelasi positif dengan kapasitas vital paru dan efisiensi pertukaran gas.

1.6.4. Aktivitas Fisik

Aktivitas fisik rutin, khususnya aktivitas aerobik, berkontribusi dalam mempertahankan elastisitas paru dan meningkatkan fungsi respirasi. Studi oleh Lee et al. (2022) menyebutkan bahwa pekerja aktif memiliki nilai FEV_1 dan kapasitas vital yang lebih tinggi dibandingkan dengan pekerja kurang gerak. Aktivitas fisik juga meningkatkan efisiensi ventilasi dan mengurangi risiko inflamasi sistemik yang memperburuk kondisi paru.

1.6.5. Paparan Rokok

Rokok mengandung ribuan senyawa kimia toksik, termasuk karbon monoksida, nikotin, dan tar, yang menyebabkan iritasi dan inflamasi saluran napas. Paparan rokok mempercepat kerusakan jaringan paru akibat sinergi dengan partikulat debu di tempat kerja. GOLD (2023) menegaskan bahwa merokok merupakan faktor risiko utama dalam patogenesis PPOK dan dapat mempercepat penurunan nilai FEV_1 secara signifikan.

1.6.6. Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD)

Alat Pelindung Diri (APD), terutama masker respirator tipe N95 atau setara, menjadi salah satu bentuk perlindungan paling efektif dalam mencegah inhalasi partikel debu berbahaya. Efektivitas APD dipengaruhi oleh frekuensi penggunaan, pelatihan pekerja, dan kepatuhan. Kim et al. (2023) dalam studi mereka menunjukkan bahwa penggunaan APD secara konsisten dapat menurunkan risiko gangguan fungsi paru hingga 35%. Namun, kendala umum yang ditemukan di lapangan mencakup kenyamanan, ketidakpatuhan, serta ketersediaan yang terbatas.

1.6.7. Kapasitas Paru (Mediator)

Kapasitas paru dalam penelitian ini diukur menggunakan spirometer digital COPD-6, yang memfasilitasi pengukuran FEV_1 , FEV_6 , dan rasio FEV_1/FEV_6 . Menurut British Thoracic Society dan GOLD (2023), rasio $FEV_1/FEV_6 < 0,75$ mengindikasikan adanya gangguan ventilasi tipe obstruktif. Alat ini terbukti valid dan reliabel sebagai alat skrining fungsional di lingkungan kerja (Alahmari et al., 2021). Kapasitas paru yang terganggu merupakan tahap awal sebelum berkembangnya gangguan paru kronik.

1.6.8. Gangguan Fungsi Paru (Dependen)

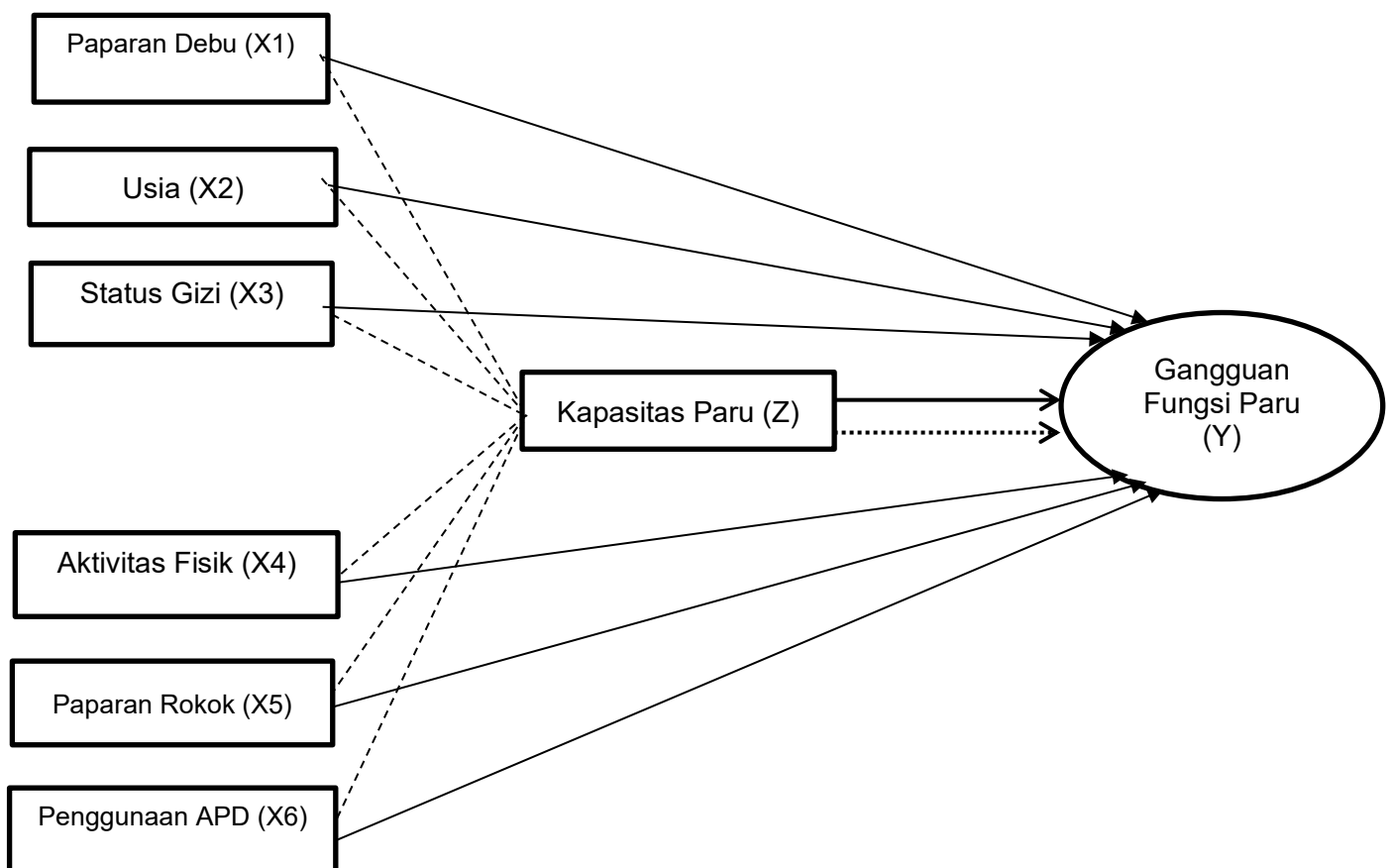
Gangguan fungsi paru merupakan outcome akhir dari paparan berulang terhadap polutan di tempat kerja. Kondisi ini mencakup berbagai manifestasi seperti sesak napas saat aktivitas ringan, batuk produktif, napas pendek, dan penurunan performa kerja. Gangguan ini tidak hanya menurunkan kualitas hidup pekerja, tetapi juga

berdampak pada produktivitas perusahaan secara keseluruhan. Menurut Lin et al. (2022), prevalensi gangguan fungsi paru di kalangan pekerja pabrik semen mencapai 27–35%, dengan sebagian besar kasus tidak terdeteksi dini akibat keterbatasan skrining rutin.

1.6.9. Integrasi Analisis Jalur

Melalui pendekatan analisis jalur, penelitian ini tidak hanya menjelaskan pengaruh langsung antar variabel, namun juga menilai pengaruh tidak langsung melalui kapasitas paru sebagai mediator. Model ini memberikan gambaran menyeluruh terhadap jalur kausal yang kompleks, memungkinkan intervensi lebih tepat sasaran dalam upaya pencegahan gangguan paru di lingkungan kerja.

1.7 Kerangka Konsep



Gambar 1.2 Kerangka Konsep

Keterangan :

X : Variabel Independen atau eksogen

Z : Variable Mediator

Y : Variabel Dependen atau endogen

—————→ : Arah Pengaruh Langsung

.....→ : Arah Pengaruh Tidak Langsung

Berdasarkan kerangka konsep yang telah disusun, penelitian ini menggunakan pendekatan analisis jalur (*path analysis*) untuk mengkaji pengaruh langsung dan tidak langsung antar variabel yang berkontribusi terhadap terjadinya gangguan fungsi paru pada pekerja. Model ini dipilih untuk menggambarkan hubungan kausal antara variabel independen, dependen, serta variabel mediasi dan kovariat yang mempengaruhi hubungan tersebut secara simultan.

Peneliti bertujuan untuk memahami bagaimana paparan debu di lingkungan kerja mempengaruhi kesehatan paru-paru pekerja, khususnya terjadinya gangguan fungsi paru. Paparan debu dalam penelitian ini tidak hanya dilihat dari kadar debu di udara, tetapi juga mempertimbangkan lama kerja per hari serta masa kerja selama bertahun-tahun. Ketiga komponen ini diintegrasikan ke dalam sebuah indikator gabungan, yaitu nilai kumulatif paparan debu, yang memberikan gambaran menyeluruh tentang beban paparan yang diterima oleh pekerja selama masa kerjanya.

Paparan debu diyakini memiliki efek langsung terhadap fungsi paru, namun dalam kerangka konsep ini juga diasumsikan bahwa pengaruh tersebut dapat terjadi secara tidak langsung melalui penurunan kapasitas paru. Kapasitas paru, yang diukur melalui tes spirometri (seperti nilai FEV₁), berperan sebagai variabel mediator. Dengan kata lain, semakin tinggi paparan debu, semakin besar kemungkinan kapasitas paru mengalami penurunan, dan hal ini pada akhirnya dapat menyebabkan gangguan fungsi paru, baik berupa gangguan obstruktif, restriktif, maupun kombinasi keduanya.

Selain paparan debu, terdapat faktor-faktor lain yang juga dipertimbangkan dalam penelitian ini karena potensinya dalam mempengaruhi kapasitas dan fungsi paru.

Faktor-faktor tersebut meliputi paparan rokok, tingkat aktivitas fisik, dan penggunaan alat pelindung diri (APD). Paparan rokok diperoleh dari informasi apakah pekerja merupakan perokok aktif atau bukan, dan dalam bentuk yang lebih kuantitatif juga dapat dihitung melalui indeks paparan merokok (pack-years). Paparan rokok dapat memperparah kerusakan paru yang dipicu oleh paparan debu. Aktivitas fisik, di sisi lain, berfungsi sebagai faktor protektif yang mampu memperkuat kapasitas paru jika dilakukan secara rutin dan dalam intensitas yang cukup. Sedangkan penggunaan APD, khususnya masker pelindung debu, juga menjadi faktor penting karena pemakaiannya yang rutin dan sesuai standar dapat mengurangi jumlah debu yang terhirup oleh pekerja.

Melalui pendekatan analisis jalur, hubungan antar variabel ini akan dianalisis secara simultan untuk mengetahui apakah pengaruh paparan debu terhadap gangguan fungsi paru bersifat langsung, tidak langsung melalui kapasitas paru, atau bahkan dimoderasi oleh faktor lain seperti paparan rokok atau penggunaan APD. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme terjadinya gangguan paru akibat paparan di tempat kerja serta memberikan dasar ilmiah bagi intervensi pencegahan di lingkungan industri.

1.7. Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

1.7.1 Paparan Debu

Definisi Operasional (DO) :

Paparan debu dalam penelitian ini diukur menggunakan nilai kumulatif paparan debu yang merupakan indikator akumulasi eksposur debu yang dialami oleh pekerja selama masa kerja di lingkungan kerja.

Nilai kumulatif paparan debu dihitung berdasarkan beberapa komponen utama, yaitu:

Kadar debu (mg/m^3): Konsentrasi debu di area kerja yang diukur menggunakan alat sampling debu (misalnya Staplex). Kadar debu ini merepresentasikan intensitas paparan per satuan volume udara.

Lama kerja per hari (jam): Durasi waktu kerja pekerja setiap hari selama terpapar

debu.

Hari kerja per tahun: Jumlah hari kerja efektif dalam satu tahun, biasanya dihitung sekitar 250 hari kerja (5 hari kerja/minggu × 50 minggu).

Masa kerja (tahun): Total tahun pekerja telah bekerja dan terpapar debu di lingkungan kerja tersebut.

Rumus yang digunakan untuk menghitung nilai kumulatif paparan debu :

Paparan Kumulatif :

$$= \frac{\text{Kadar Debu (mg/m}^3\text{)} \times \text{Jam Kerja/Hari} \times \text{Hari Kerja/Tahun} \times \text{Masa Kerja (Tahun)}}{2000}$$

Kadar debu adalah jumlah partikel padat yang terdispersi di udara di lingkungan kerja yang diukur menggunakan alat Staplex High Volume Air Sampler (Staplex Model TFIA). Staplex adalah salah satu merek alat pengambil sampel debu atau partikel di udara yang digunakan untuk pengukuran Total Suspended Particulates (TSP) atau partikulat terhirup.

Sumber : International Labour Organization. (2021).

Kriteria Objektif (KO) :

Guna keperluan analisis statistik dan kategorisasi risiko, nilai kumulatif paparan debu dapat diklasifikasikan menjadi 3 kategori sebagai berikut:

Kategori	Nilai Kumulatif Paparan Debu (mg/m ³ ·tahun)	Makna
Rendah	< 50	Pekerja terpapar debu dalam jumlah relatif kecil selama masa kerjanya.
Sedang	50 – 100	Paparan menengah, ada potensi gangguan paru ringan hingga sedang.
Tinggi	> 100	Paparan signifikan, berisiko tinggi terhadap gangguan fungsi paru.

Sumber: (Occupational Safety and Health Administration (OSHA), (2023).

1.7.2 Usia

Definisi Operasional (DO) :

Usia pekerja dihitung sejak tanggal lahir hingga tanggal penelitian dilakukan dan dinyatakan dalam satuan tahun penuh. Bertambahnya usia

seseorang dapat menyebabkan penurunan kondisi fisik dan ketahanan tubuh. Secara umum, risiko gangguan kesehatan, termasuk gangguan fungsi paru, cenderung meningkat pada pekerja yang berusia di atas 35 tahun. Hal ini disebabkan oleh penurunan fungsi fisiologis tubuh seiring bertambahnya usia, termasuk menurunnya kekuatan sistem imun, sehingga individu lebih rentan terhadap paparan debu dan faktor lingkungan lainnya.

Kriteria Objektif (KO) :

1. Dewasa Muda : 18–35 Tahun
2. Dewasa Madya : 36–50 Tahun
3. Dewasa Akhir : 51-60 Tahun

Sumber: European Respiratory Society. (2020).

1.7.3 Status Gizi

Definisi Operasional (DO)

Status gizi pada pekerja di industri semen mengacu pada keseimbangan asupan dan penyerapan zat gizi dalam tubuh, yang dipengaruhi oleh pola konsumsi makanan. Status gizi yang baik berperan dalam meningkatkan daya tahan tubuh terhadap berbagai risiko kesehatan, termasuk gangguan fungsi paru akibat paparan debu industri. Dalam penelitian ini, status gizi diukur berdasarkan Indeks Massa Tubuh (IMT).

Kriteria Objektif (KO) :

Status gizi pekerja dibagi menjadi dua kategori berdasarkan Indeks Massa Tubuh (IMT) sebagai berikut :

1. Kategori Gizi Cukup (Normal) : IMT 18,5 - 24,9 kg/m²
2. Kategori Kelebihan Gizi (Obesitas) : IMT $\geq$ 25 kg/m²

Sumber: World Health Organization, (2022).

1.7.4 Aktivitas fisik

Definisi Operasional (DO)

Aktivitas fisik pekerja di luar jam kerja merujuk pada segala bentuk kegiatan fisik yang dilakukan di luar tugas utama di perusahaan, baik untuk meningkatkan kebugaran tubuh maupun sebagai aktivitas rekreasi. Aktivitas ini mencakup olahraga teratur, berjalan kaki, bersepeda, kegiatan kebersihan rumah tangga, serta aktivitas fisik lainnya yang dilakukan secara sukarela dan terencana. Dalam penelitian ini, aktivitas fisik diukur berdasarkan intensitas, durasi, dan frekuensi kegiatan yang dilakukan setiap minggu. Aktivitas fisik yang cukup dan teratur berperan dalam meningkatkan kapasitas paru-paru, memperbaiki sirkulasi oksigen, serta mengurangi risiko gangguan fungsi paru akibat paparan debu di lingkungan kerja.

Kriteria Objektif (KO)

Aktivitas fisik pekerja selain bekerja dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Tidak Ada Aktivitas Fisik (Kode 0), artinya tidak pernah melakukan aktivitas fisik seperti olahraga atau kegiatan fisik lainnya di luar pekerjaan.
2. Ringan (Kode 1), aktivitas seperti berjalan santai, menyapu, atau berkebun ringan. Frekuensi ≤ 3 kali/minggu, durasi < 30 menit/sesi.
3. Sedang (Kode 2), aktivitas seperti jogging ringan, bersepeda santai, senam. Frekuensi ≥ 3 kali/minggu, durasi ≥ 30 menit/sesi.
4. Berat (Kode 3), aktivitas intens seperti lari cepat, olahraga berat, angkat beban. Frekuensi ≥ 3 kali/minggu, durasi ≥ 30 menit/sesi.

Sumber: World Health Organization, (2020).

1.7.5 Paparan Rokok

Definisi Operasional (DO) :

Paparan rokok merupakan kondisi terpaparnya individu secara terus-menerus terhadap asap rokok aktif, yang berpotensi menyebabkan gangguan sistem pernapasan. Paparan rokok diukur menggunakan Indeks paparan rokok

(*Pack-Years*) yaitu ukuran kuantitatif untuk menilai total paparan rokok berdasarkan jumlah batang rokok yang dihisap per hari dikalikan dengan jumlah tahun merokok, kemudian dibagi 20 (jumlah batang dalam satu bungkus rokok).

1. Kriteria Objektif (KO)

1. Tidak terpapar = 0 (bukan perokok atau mantan perokok dengan nilai indeks 0)
2. Ringan = <10 pack-years
3. Sedang = 10–20 pack-years
4. Berat = >20 pack-years

Sumber: World Health Organization (WHO), (2022).

1.7.6 Penggunaan APD

Definisi Operasional (DO)

Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) dalam penelitian ini merujuk pada pemanfaatan perlengkapan pelindung yang wajib dikenakan oleh pekerja di industri semen untuk mengurangi risiko kecelakaan kerja serta dampak kesehatan akibat paparan debu di lingkungan kerja. Penggunaan APD, terutama masker atau respirator yang sesuai standar, berperan penting dalam mencegah inhalasi debu yang dapat mencapai saluran pernapasan dan menyebabkan gangguan fungsi paru. Kepatuhan dalam penggunaan APD yang tepat dan konsisten dapat membantu menurunkan risiko gangguan pernapasan akibat paparan debu industri.

Kriteria Objektif (KO) :

1. Konsisten : Kode 2
2. Tidak konsisten : Kode 1

Sumber: Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2023)

1.7.7 Kapasitas Paru

Definisi Operasional (DO)

Gangguan fungsi paru adalah kondisi penurunan fungsi ventilasi paru yang diukur menggunakan spirometri tipe COPD-6.

Kriteria Objektif (KO)

Kategori	Criteria Radio FEV1	Keterangan
Normal	$\geq 80\%$	Fungsi paru normal
Obstruksi Ringan	70% – 79%	Gangguan fungsi paru ringan
Obstruksi Sedang	51% – 69%	Gangguan fungsi paru sedang
Obstruksi Berat	$< 50\%$	Gangguan fungsi paru berat

Sumber : *Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD). (2023).*

1.7.8 Gangguan Fungsi Paru

Definisi Operasional (DO)

Fungsi paru merujuk pada kualitas paru pada aliran udara yang diukur dengan menggunakan spirometri COPD-6.

Kriteria Objektif (KO)

1. Gangguan Fungsi Paru (Abnormal)

FEV1 $< 80\%$ Ini menunjukkan adanya penurunan fungsi paru yang signifikan, seperti yang terlihat pada kondisi COPD atau gangguan fungsi paru lainnya yang bisa disebabkan oleh paparan debu.

Penurunan FEV1 menunjukkan adanya obstruksi saluran napas atau gangguan dalam kapasitas paru.

2. Tidak Terjadi Gangguan Fungsi Paru (Normal)

FEV1 $>80\%$ dari nilai prediksi, hal ini menunjukkan bahwa fungsi paru normal tanpa indikasi obstruksi atau gangguan signifikan pada saluran napas. FEV1 yang $\geq 80\%$ dari nilai prediksi berarti kapasitas paru dan aliran udara cukup baik dan tidak menunjukkan tanda-tanda penyakit paru obstruktif.

Sumber : *Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD). (2024).*

1.8 Hipotesis Penelitian

- 1.8.1. Ada pengaruh langsung paparan debu terhadap kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.2. Ada pengaruh langsung usia terhadap kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.3. Ada pengaruh langsung status gizi terhadap kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.4. Ada pengaruh langsung aktivitas fisik terhadap kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.5. Ada pengaruh langsung paparan rokok terhadap kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.6. Ada pengaruh langsung penggunaan APD terhadap kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.7. Ada pengaruh langsung kapasitas paru terhadap gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.8. Ada pengaruh tidak langsung paparan debu terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.9. Ada pengaruh tidak langsung usia terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.10. Ada pengaruh tidak langsung status gizi terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.11. Ada pengaruh tidak langsung aktivitas fisik terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.12. Ada pengaruh tidak langsung paparan rokok terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025
- 1.8.13. Ada pengaruh tidak langsung penggunaan APD terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru pada pekerja di PT Semen Tonasa tahun 2025.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan desain observasional analitik menggunakan pendekatan cross-sectional. Desain cross-sectional dipilih karena penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara paparan debu kumulatif (yang dihitung dari kadar debu, lama kerja, dan masa kerja), usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok (diukur dengan indeks paparan rokok), penggunaan alat pelindung diri (APD), kapasitas paru, dan gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa dalam satu waktu tertentu. (Swarjana, 2023).

Pengukuran kadar debu respirabel dilakukan menggunakan alat *Staplex High Volume Air Sampler* yang ditempatkan pada zona pernapasan pekerja di area produksi untuk mendapatkan konsentrasi debu di lingkungan kerja. Nilai paparan debu kumulatif dihitung berdasarkan kadar debu yang terukur dikalikan dengan lama kerja dan masa kerja pekerja, sehingga memberikan gambaran total akumulasi pajanan debu selama periode kerja.

Paparan rokok diukur menggunakan indeks paparan rokok yang memperhitungkan durasi dan intensitas kebiasaan merokok pekerja. Sementara itu, penggunaan APD yang tepat dan konsisten juga didokumentasikan sebagai variabel pengendalian risiko.

Pemeriksaan kapasitas paru dilakukan menggunakan spirometer digital COPD-6, yang mengukur parameter seperti FEV_1 , FEV_6 , dan rasio FEV_1/FEV_6 untuk menilai fungsi ventilasi paru secara objektif. Spirometri ini memberikan data mengenai status kapasitas paru pekerja sebagai variabel mediator yang mempengaruhi gangguan fungsi paru.

2.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dengan judul "Analisis Paparan Debu terhadap Gangguan Fungsi Paru pada Pekerja di PT Semen Tonasa Tahun 2025" dilaksanakan pada bulan April 2025 di PT Semen Tonasa, yang berlokasi di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, Provinsi Sulawesi Selatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis pengaruh paparan debu kumulatif (yang meliputi kadar debu, lama kerja, dan masa kerja), usia, status gizi, aktivitas fisik, paparan rokok (indeks paparan rokok), serta penggunaan alat pelindung diri (APD) terhadap gangguan fungsi paru pada pekerja di PT Semen Tonasa. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis peran kapasitas paru sebagai variabel mediator dalam hubungan antara paparan debu dan faktor-faktor tersebut dengan gangguan fungsi paru. Analisis jalur (*path analysis*) digunakan untuk menguji hubungan langsung dan tidak langsung antar variabel sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme gangguan fungsi paru akibat paparan debu di lingkungan kerja industri semen.

2.3. Populasi dan Sampel Penelitian

2.3.1. Populasi

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh pekerja di area pabrik PT Semen Tonasa, yang berjumlah 512 orang.

2.3.2. Sampel

2.3.2.1. Penentuan Ukuran Sampel

Penentuan jumlah sampel dalam penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan dua pendekatan yang lazim digunakan dalam studi epidemiologi dan analisis hubungan antar variabel, yaitu rumus Lemeshow dan pedoman jumlah sampel untuk analisis jalur (*path analysis*).

Berdasarkan rumus Lemeshow (1997) untuk studi cross-sectional, dengan asumsi tingkat kepercayaan 95% ($Z = 1,96$),

proporsi kejadian (p) sebesar 0,5, dan margin of error (d) sebesar 0,08, diperoleh estimasi jumlah sampel sebagai berikut:

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{d^2} = \frac{(1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{(0,08)^2} = 150$$

Selanjutnya, karena populasi terbatas ($N = 512$), maka dilakukan koreksi populasi terbatas:

$$n_{\text{adj}} = \frac{150}{1 + \frac{150-1}{512}} \approx 125$$

Sementara itu, karena penelitian ini menggunakan pendekatan analisis jalur (path analysis), maka jumlah sampel juga dihitung berdasarkan kompleksitas model struktural. Dalam model yang digunakan, terdapat 8 variabel independen (kadar debu, lama kerja, masa kerja, usia, status gizi, aktivitas fisik, penggunaan APD, dan paparan rokok), 1 variabel mediator (kapasitas paru), dan 1 variabel dependen (gangguan fungsi paru), dengan total 13 jalur pengaruh yang diuji.

Berdasarkan pedoman dari Hair et al. (2022), jumlah sampel minimal yang direkomendasikan adalah 5 hingga 10 kali jumlah jalur dalam model, sehingga jumlah minimum sampel yang dibutuhkan berkisar antara 65 hingga 130 orang.

Oleh karena itu, dengan memperhatikan hasil perhitungan dari kedua pendekatan tersebut, serta mempertimbangkan keterbatasan sumber daya, ketersediaan responden yang memenuhi kriteria inklusi, dan kebutuhan minimum model analisis, maka jumlah sampel yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan sebanyak 125 orang. Jumlah ini dinilai cukup representatif dan sesuai secara statistik untuk dianalisis menggunakan metode analisis jalur.

2.3.2.2. Teknik Pengambilan Sampel

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simple random sampling (pengambilan sampel secara acak sederhana), yaitu setiap pekerja yang memenuhi kriteria inklusi memiliki peluang yang sama untuk terpilih sebagai responden. Teknik ini dilakukan agar sampel yang diambil benar-benar representatif terhadap populasi.

2.3.2.3. Tahapan Pengambilan Sampel

Metode yang digunakan adalah *simple random sampling*, yaitu teknik pengambilan sampel di mana setiap anggota populasi memiliki peluang yang sama untuk terpilih.

1. Menentukan populasi target, yaitu seluruh pekerja yang memenuhi kriteria inklusi (misalnya: masa kerja ≥ 1 tahun, tidak memiliki riwayat penyakit paru kronis).
2. Menyusun kerangka sampel, berupa daftar nama-nama pekerja yang sesuai kriteria.
3. Menentukan jumlah sampel, yakni sebanyak 125 responden dari total populasi.
4. Melakukan pemilihan acak, menggunakan bantuan *random number table* atau perangkat lunak statistik seperti Excel/SPSS.
5. Verifikasi dan konfirmasi responden, untuk memastikan kesesuaian dan kesiediaan partisipasi.

Teknik ini dipilih agar sampel representatif dan bebas bias seleksi.

2.3.2.4. Identifikasi populasi

Hal pertama yang dilakukan dalam mengidentifikasi populasi adalah mendata seluruh pekerja PT Semen Tonasa yang berjumlah 512 orang. Kemudian, mengelompokkan pekerja berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.

2.3.2.5. Penetapan Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi:

Memastikan pekerja yang dipilih bekerja di area fabrikasi, berusia 18–60 tahun, memiliki masa kerja minimal 1 tahun, dan bersedia mengikuti penelitian.

Kriteria eksklusi:

Mengeluarkan pekerja yang tidak terpapar langsung debu semen, memiliki riwayat penyakit paru-paru kronis (asma, PPOK), atau tidak memberikan persetujuan (informed consent).

2.3.2.6. Pengacakan Sampel

Berdasarkan data daftar pekerja yang memenuhi kriteria inklusi, dilakukan pengacakan menggunakan random number generator atau metode undian untuk memilih 125 responden secara acak.

1. Konfirmasi dan Persetujuan Partisipasi

Responden yang terpilih diberikan penjelasan mengenai penelitian dan diminta untuk menandatangani lembar persetujuan (informed consent) sebelum dilakukan pemeriksaan lebih lanjut.

2. Pengambilan Data

Pemeriksaan kapasitas paru dilakukan menggunakan spirometer digital tipe COPD-6 yang dirancang khusus untuk pengukuran fungsi paru secara cepat dan praktis di lingkungan kerja. Alat ini mengukur parameter penting seperti FEV_1 (Forced Expiratory Volume dalam 1 detik), FEV_6 (Forced Expiratory Volume dalam 6 detik), dan rasio FEV_1/FEV_6 yang digunakan untuk menilai adanya gangguan ventilasi paru, khususnya obstruksi saluran napas. COPD-6 sangat cocok digunakan karena portabel, mudah dioperasikan, dan tidak memerlukan tenaga medis spesialis,

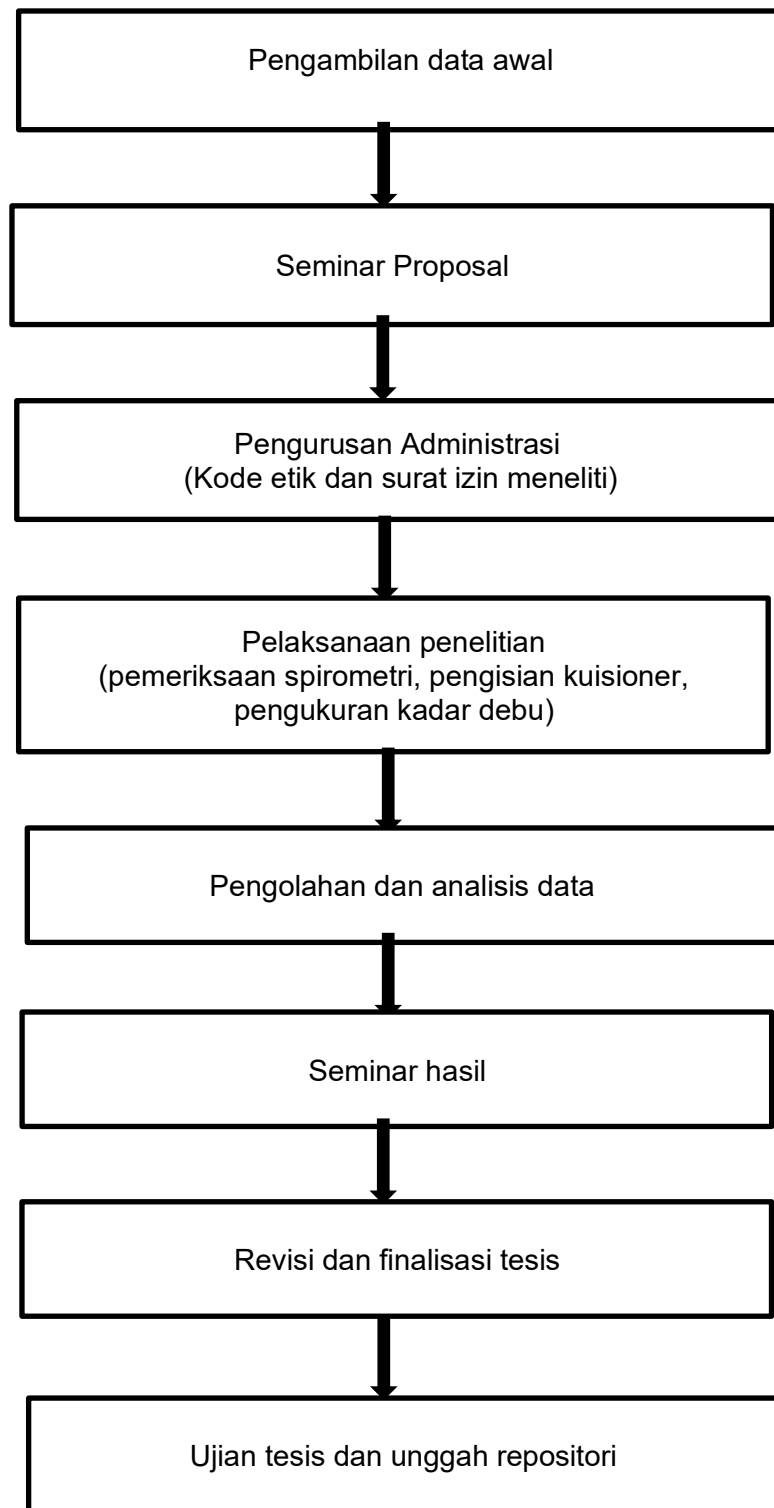
sehingga dapat memberikan data fungsi paru yang akurat sebagai indikator gangguan fungsi paru pada pekerja yang terpapar debu.

Pengukuran paparan debu menggunakan *Staplex High Volume Air Sampler*. Data mengenai kadar paparan debu dikumpulkan menggunakan alat *Staplex High Volume Air Sampler*, yang mampu mengambil sampel udara dalam volume besar untuk mengukur konsentrasi debu partikulat di area kerja. Alat ini efektif untuk mengukur Total Suspended Particulates (TSP) serta partikulat respirable seperti PM_{10} , dengan pemasangan pada ketinggian zona pernapasan pekerja. Pengukuran dilakukan secara kontinu selama jam kerja untuk mendapatkan nilai kadar debu aktual yang dihadapi pekerja, sehingga data paparan debu kumulatif dapat diperoleh dengan menggabungkan kadar debu dengan durasi lama dan masa kerja pekerja. Data ini menjadi variabel utama dalam analisis pengaruh paparan debu terhadap gangguan fungsi paru

3. Validasi dan Pengolahan Data

Data yang terkumpul diperiksa kembali untuk memastikan kelengkapan dan validitasnya sebelum dianalisis lebih lanjut dengan analisis jalur (*Path Analysis*) untuk mengetahui hubungan antara variabel yang diteliti.

2.4. Alur Penelitian



Gambar 2.1 Alur Penelitian

2.5. Instrumen Penelitian

Instrumen penelitian yang digunakan bisa berupa kuesioner dan pengukuran fisik untuk mengumpulkan data yang relevan. Berikut adalah beberapa instrumen yang dapat digunakan dalam penelitian ini:

1. Kuesioner atau Wawancara Struktural

Kuesioner digunakan untuk menggali informasi mengenai karakteristik pekerja, seperti umur, masa kerja, dan status gizi, yang merupakan faktor individu yang dapat mempengaruhi fungsi paru. Selain itu, kuesioner juga mencakup paparan rokok dan olahraga, yang dapat berperan sebagai faktor risiko atau protektif terhadap gangguan fungsi paru. Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) turut dievaluasi untuk mengetahui tingkat kepatuhan pekerja dalam melindungi diri dari paparan debu. Untuk memastikan keakuratan data, wawancara struktural dilakukan guna mengkonfirmasi jawaban dari kuesioner serta menggali informasi tambahan yang mungkin tidak tertangkap dalam pengisian kuesioner.

Swarjana (2023), Kementerian Kesehatan RI (2018).

2. Pengukuran Paparan Debu

Pengukuran kadar debu dilakukan oleh Departemen Semen Tonasa Medical Centre (STMC) PT Semen Tonasa menggunakan alat yang sesuai dengan standar NAB debu sebesar 10 mg/Nm³. Data kadar debu diperoleh langsung dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh departemen tersebut di area kerja yang berpotensi terpapar debu, yang selanjutnya digunakan dalam analisis penelitian ini.

NIOSH (2019), WHO (2021), Kementerian Kesehatan RI (2018).

3. Kapasitas Paru (Spirometer)

Tes kesehatan paru untuk mengukur fungsi paru pada penelitian ini menggunakan alat spirometri tipe COPD-6, yang merupakan perangkat medis untuk melakukan pemeriksaan spirometri sederhana dalam mendeteksi adanya gangguan fungsi paru, khususnya pada penyakit paru obstruktif kronik (COPD).

Alat ini memiliki fungsi untuk mengukur beberapa parameter penting dalam fungsi paru, seperti Volume Ekspirasi Maksimal (PEF) dan Volume Sekunder (FEV1), yang digunakan untuk mendiagnosis obstruksi saluran napas dan tingkat keparahan gangguan paru.

Alat spirometri COPD-6 digunakan untuk mengukur fungsi paru dengan cara yang sederhana. Pertama, pastikan alat terkalibrasi dengan baik dan ditempatkan di tempat yang bersih serta kering. Sebelum pengukuran, responden diminta untuk duduk atau berdiri dalam posisi tegak dan rileks, serta menghindari makan berat atau aktivitas fisik beberapa jam sebelumnya. Selanjutnya, responden diminta untuk menarik napas dalam-dalam dan menghembuskan napas sekuat mungkin ke dalam mouthpiece selama sekitar 6 detik. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali, dan hasil terbaik diambil untuk dianalisis. Alat ini secara otomatis mencatat hasil tes FEV1 (Forced Expiratory Volume in 1 second), yang ditampilkan di layar alat. Setelah pengukuran, hasil yang menunjukkan gangguan fungsi paru digunakan untuk referensi lebih lanjut.

COPD-6 Spirometer Product Brochure, (n.d.)

4. Observasi dan Pengamatan Langsung

Lembar observasi digunakan sebagai instrumen untuk mencatat kondisi lingkungan kerja, termasuk tingkat kebersihan udara, ventilasi, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) oleh pekerja, serta paparan rokok dan aktivitas fisik. Pengamatan langsung dilakukan selama penelitian di area kerja untuk memastikan kesesuaian antara laporan dari kuesioner dengan kondisi aktual di lapangan. Tujuan utama dari observasi ini adalah untuk menggali informasi mengenai karakteristik pekerja, seperti umur, masa kerja, status gizi, paparan rokok, kepatuhan dalam penggunaan APD, serta aktivitas fisik, yang dapat berpengaruh terhadap fungsi paru pekerja., Kementerian Kesehatan RI (2018).

2.6. Pengelolaan dan Analisis Data

2.6.1. Pengelolaan Data

Adapun tahapan-tahapan dalam pengolahan data yaitu:

1. Editing, data yang telah dikumpulkan dari kuesioner, pengukuran kapasitas paru menggunakan alat spirometri, dan hasil analisis debu diperiksa untuk memastikan kelengkapan dan konsistensinya. Jika terdapat data yang tidak lengkap atau tidak logis, dilakukan pengecekan ulang pada sumber data.
2. Coding, yaitu kegiatan mengubah data yang berbentuk huruf menjadi data yang berbentuk angka yang berguna untuk mempermudah dalam analisis data
3. Cleaning, pada tahap ini, data diperiksa kembali untuk mendeteksi kesalahan input, anomali, atau duplikasi yang dapat mempengaruhi hasil analisis. Data yang tidak valid diperbaiki atau dihapus jika memang tidak dapat digunakan.
4. Processing, setelah proses Cleaning dilakukan, selanjutnya dilakukan pemrosesan atau pengolahan data dengan menggunakan software SPSS.
5. Tabulasi, yaitu pengorganisasian data sedemikian rupa agar dapat dengan mudah untuk dijumlah, disusun dan untuk disajikan serta dianalisis.

2.6.2. Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dalam tiga tahap, yaitu analisis univariat, bivariat, dan Analisis Jalur (*Path Analysis*):

1. Analisis Univariat

Analisis univariat bertujuan mendeskripsikan distribusi data tiap variabel, meliputi paparan debu, kapasitas paru, gangguan fungsi paru, dan karakteristik pekerja. Statistik deskriptif yang digunakan mencakup rata-rata, standar deviasi, median, serta distribusi frekuensi untuk variabel kategorik. Kadar debu dianalisis melalui pengukuran Low Volume Air Sampler (LVAS), sedangkan kapasitas paru dievaluasi dengan spirometri untuk mengidentifikasi gangguan fungsi paru.

2. Analisis Bivariat

Analisis bivariat digunakan untuk melihat hubungan antara dua variabel dalam penelitian ini. Analisis ini mencakup hubungan antara paparan debu dengan gangguan fungsi paru, serta keterkaitan antara kapasitas paru dan gangguan fungsi paru. Selain itu, karakteristik pekerja seperti usia, masa kerja, status gizi, paparan rokok, dan penggunaan alat pelindung diri (APD) juga dianalisis untuk memahami pengaruhnya terhadap kapasitas paru dan gangguan fungsi paru.

3. Analisis Jalur (*Path Analysis*)

Analisis Jalur (*Path Analysis*) digunakan menguji hubungan langsung dan tidak langsung antar variabel dalam penelitian. Model ini bertujuan mengetahui apakah kapasitas paru berperan sebagai mediator dalam hubungan antara paparan debu dan gangguan fungsi paru. Selain itu, analisis Jalur juga digunakan memahami pengaruh karakteristik pekerja terhadap gangguan fungsi paru melalui kapasitas paru. Proses analisis dilakukan dengan perangkat lunak yang memungkinkan estimasi jalur hubungan antar variabel serta evaluasi kesesuaian model mengenai mekanisme gangguan fungsi paru akibat paparan debu pada pekerja di PT Semen Tonasa.

2.7. Penyajian Data

Data yang telah diolah disajikan dalam tabel distribusi beserta penjelasan naratif. Karakteristik responden ditampilkan pada tabel frekuensi dan persentase, sementara data paparan debu dibandingkan nilai ambang batas (NAB). Analisis jalur digunakan mengevaluasi pengaruh langsung maupun tidak langsung antar variabel dengan kapasitas paru sebagai mediator. Hasil disajikan pada tabel mencantumkan p-value, koefisien regresi, serta hubungan antar variabel. Diagram jalur memperjelas hubungan tersebut, dengan interpretasi hasil disajikan naratif untuk menjelaskan pola hubungan dan implikasi penelitian.

