ANALISIS RISIKO MIKROBIOLOGIS: DETEKSI BAKTERI AIRBONE PATOGEN DI LINGKUNGAN KERJA DAN HUBUNGANNYA DENGAN KESEHATAN SALURAN PERNAPASAN PASUKAN ORANGE

RINGKASAN PROPOSAL

Penelitian ini bertujuan menganalisis risiko mikrobiologis akibat paparan bakteri *airborne* di lingkungan kerja Pasukan Orange serta mengevaluasi hubungannya dengan kesehatan respiratori sebagai dasar penyusunan rekomendasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Petugas kebersihan perkotaan merupakan kelompok pekerja yang berisiko tinggi terpapar bioaerosol yang berasal dari pengelolaan sampah dan drainase, sehingga berpotensi mengalami gangguan kesehatan saluran pernapasan. Penelitian menggunakan desain observasional analitik dengan pendekatan *cross-sectional* melalui pengukuran konsentrasi bakteri *airborne* menggunakan metode *active air sampling*, identifikasi bakteri dengan metode kultur dan uji mikrobiologi, serta penilaian kesehatan respiratori menggunakan kuesioner ATS-DLD, pemeriksaan spirometri, dan pemeriksaan leukosit. Data dianalisis secara univariat, bivariat, dan multivariat untuk mengidentifikasi hubungan antara paparan bakteri *airborne* dengan gangguan kesehatan respiratori. Luaran penelitian yang diharapkan meliputi data kualitas udara mikrobiologis pada lingkungan kerja Pasukan Orange, identifikasi bakteri patogen *airborne*, model hubungan antara paparan bioaerosol dan kesehatan respiratori pekerja, publikasi ilmiah, serta rekomendasi pengendalian bioaerosol yang dapat mendukung implementasi program K3 bagi petugas kebersihan perkotaan.

BAB 1. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Penyakit akibat kerja masih menjadi salah satu permasalahan kesehatan masyarakat di dunia yang memberikan dampak besar terhadap kualitas hidup pekerja dan produktivitas kerja. Organisasi Kesehatan Dunia (World Health Organization/WHO) dan Organisasi Perburuhan Internasional (International Labour Organization/ILO) melaporkan bahwa sekitar 1,9 juta kematian setiap tahun disebabkan oleh penyakit dan cedera yang berhubungan dengan pekerjaan. Sebagian besar kematian tersebut berasal dari penyakit tidak menular, terutama penyakit respiratori dan penyakit kardiovaskular. Selain itu, paparan partikulat, gas, dan asap di lingkungan kerja diperkirakan menyebabkan sekitar 450.000 kematian setiap tahun, yang sebagian besar berkaitan dengan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK). Kondisi

tersebut menunjukkan bahwa kualitas udara di lingkungan kerja merupakan faktor penting yang memengaruhi kesehatan pekerja dan memerlukan upaya pengendalian yang efektif sebagai bagian dari implementasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).[1]

Kelompok pekerja yang terlibat dalam pengelolaan sampah, drainase, dan kebersihan lingkungan merupakan salah satu populasi yang memiliki risiko tinggi mengalami paparan bioaerosol karena aktivitasnya dilakukan secara langsung di lingkungan yang kaya akan kontaminan biologis. Di Indonesia, kondisi tersebut menjadi perhatian karena gangguan kesehatan saluran pernapasan masih merupakan salah satu masalah kesehatan yang penting. Berdasarkan Survei Kesehatan Indonesia (SKI) Tahun 2023, gangguan kesehatan saluran pernapasan masih menjadi salah satu masalah kesehatan yang banyak dijumpai di Indonesia, terutama pada kelompok masyarakat dengan paparan lingkungan yang tinggi. Pekerja yang beraktivitas di lingkungan dengan paparan debu, limbah, serta agen biologis memiliki risiko lebih besar mengalami gangguan fungsi paru akibat paparan polutan yang berlangsung secara terus-menerus. Oleh karena itu, pengendalian kualitas udara di lingkungan kerja menjadi salah satu upaya penting dalam mencegah penyakit akibat kerja dan meningkatkan derajat kesehatan pekerja.[2,3]

Kualitas lingkungan kerja merupakan faktor krusial yang secara signifikan memengaruhi kesehatan dan produktivitas manusia, terutama mengingat tingginya durasi paparan yang dialami pekerja setiap harinya. Polusi udara tidak hanya terdiri dari polutan kimia, tetapi juga kontaminan biologis atau bioaerosol yang mencakup bakteri, virus, jamur, serta produk sampingan mikrob seperti endotoksin. Bioaerosol diperkirakan berkontribusi terhadap 5% hingga 34% dari total polusi udara di lingkungan dalam maupun luar ruangan. Di negara berkembang, beban penyakit akibat polusi udara biologis ini semakin berat karena faktor overpopulasi, keterbatasan infrastruktur sanitasi, dan kurangnya standar pedoman kualitas udara mikrobiologis yang jelas.[4–6]

Pasukan Orange, sebagai tenaga kebersihan yang mengelola drainase dan limbah perkotaan, bekerja di lingkungan yang memiliki risiko paparan biologis sangat tinggi. Aktivitas yang melibatkan pengelolaan limbah organik dan air selokan menjadi sumber utama bioaerosol. Limbah cair dan sistem drainase diketahui mengandung konsentrasi bakteri aerosol yang signifikan, terutama saat terjadi agitasi mekanis yang menyebabkan mikroorganisme berpindah dari fase cair ke udara. Mikroorganisme yang umum ditemukan dalam lingkungan kerja semacam ini meliputi bakteri patogen oportunistik seperti *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Escherichia coli*. Paparan terhadap bakteri-bakteri

ini secara terus-menerus dapat memicu berbagai gangguan kesehatan respiratori, mulai dari reaksi alergi, asma, hingga infeksi serius seperti pneumonia dan tuberkulosis.[4,7,8]

Secara mekanis, dampak kesehatan bioaerosol sangat ditentukan oleh ukuran partikelnya. Partikel dengan diameter aerodinamis antara 1 hingga 10 μm (fraksi respirabel) merupakan perhatian utama karena memiliki kemampuan untuk menembus jauh ke dalam saluran pernapasan manusia hingga mencapai alveoli. Begitu terhirup, komponen dinding sel bakteri seperti endotoksin dapat memicu respon inflamasi sistemik dan penurunan fungsi paru. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa pekerja yang terpapar debu organik dan bioaerosol dalam jangka panjang mengalami penurunan signifikan pada parameter fungsi paru yang diukur melalui uji spirometri.[6,9,10] Namun, hingga saat ini, data komprehensif mengenai risiko mikrobiologis spesifik pada Pasukan Orange di Indonesia masih sangat terbatas.

Di Indonesia, petugas kebersihan jalan dan pengelola sampah merupakan kelompok pekerja yang memiliki risiko tinggi mengalami gangguan kesehatan saluran pernapasan akibat paparan debu, partikulat, dan bioaerosol selama bekerja. Beberapa penelitian pada petugas penyapu jalan menunjukkan tingginya prevalensi gangguan fungsi paru, penurunan nilai FEV1/FVC, serta meningkatnya kejadian gejala respiratori kronis yang dipengaruhi oleh lama paparan, kebiasaan merokok, dan kepatuhan penggunaan alat pelindung diri. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas udara di lingkungan kerja menjadi salah satu faktor penting yang perlu dievaluasi secara komprehensif.[9,11,12]

Beberapa penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa petugas kebersihan jalan dan pengelola sampah merupakan kelompok pekerja yang memiliki risiko tinggi mengalami gangguan kesehatan saluran pernapasan akibat paparan debu, partikulat, dan bioaerosol selama bekerja. Analisis terhadap 809 petugas Penanganan Prasarana dan Sarana Umum (PPSU) di Jakarta Timur menunjukkan bahwa hanya 33,96% pekerja memiliki fungsi paru normal, sedangkan sebagian besar (65,17%) mengalami gangguan fungsi paru tipe restriktif. Selain itu, penelitian lain melaporkan prevalensi Penyakit Paru Obstruktif Kronik (PPOK) pada penyapu jalan sebesar 6,5%, lebih tinggi dibandingkan prevalensi nasional. Berbagai penelitian juga menunjukkan bahwa paparan polusi udara secara terus-menerus menyebabkan penurunan fungsi bersihan mukosiliar saluran napas, sementara rendahnya kepatuhan penggunaan alat pelindung diri (APD) dan lamanya durasi paparan menjadi faktor risiko utama yang berkontribusi terhadap gangguan fungsi paru pada kelompok pekerja tersebut. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa petugas kebersihan perkotaan merupakan kelompok yang rentan terhadap gangguan kesehatan respiratori

sehingga diperlukan upaya identifikasi risiko mikrobiologis di lingkungan kerja sebagai dasar penyusunan strategi pencegahan dan pengendalian yang lebih efektif.

Identifikasi risiko mikrobiologis memerlukan strategi pengambilan sampel yang akurat. Metode pengambilan sampel udara aktif dianggap lebih sensitif dan presisi dibandingkan metode pasif karena mampu menarik volume udara tertentu melalui pompa untuk mengumpulkan mikroorganisme inhalabel. Kombinasi antara identifikasi mikrob melalui metode kultur tradisional dan penilaian kesehatan menggunakan instrumen standar seperti kuesioner ATS-DLD (*American Thoracic Society and the Division of Lung Diseases*) serta uji spirometri sangat diperlukan untuk mengevaluasi hubungan antara kualitas udara kerja dan dampak respiratori secara nyata. Kuesioner ATS-DLD telah lama diakui sebagai alat valid untuk mensurvei gejala pernapasan kronis pada populasi pekerja.[4,5,7,9]

Penelitian mengenai kualitas udara mikrobiologis selama ini lebih banyak dilakukan pada lingkungan rumah sakit, sekolah, dan bangunan publik, sedangkan penelitian pada lingkungan kerja terbuka seperti pengelolaan sampah dan drainase masih relatif terbatas. Di Indonesia, penelitian yang mengintegrasikan pengukuran konsentrasi bakteri airborne menggunakan metode *active air sampling*, identifikasi bakteri patogen, serta pemeriksaan fungsi paru menggunakan spirometri dan kuesioner ATS-DLD pada petugas kebersihan perkotaan, khususnya Pasukan Orange, masih belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat mengisi kesenjangan tersebut melalui pendekatan analisis risiko mikrobiologis yang lebih komprehensif. [7,9,13,14]

Urgensi penelitian ini terletak pada perlunya analisis risiko mikrobiologis yang berbasis bukti untuk melindungi kelompok pekerja rentan. Adanya kesenjangan pengetahuan (*knowledge gap*) mengenai beban mikrobiologis di lingkungan kerja terbuka dan semiterbuka sering kali menyebabkan pengabaian protokol Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) yang tepat. Tanpa adanya pedoman praktis untuk pengendalian bioaerosol, risiko penurunan kesehatan paru jangka panjang pada Pasukan Orange akan terus meningkat, yang pada akhirnya akan berdampak pada beban kesehatan masyarakat secara keseluruhan.[9,11]

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis konsentrasi bakteri airborne menggunakan metode *active air sampling*, identifikasi bakteri patogen hasil kultur, serta evaluasi fungsi paru melalui spirometri dan kuesioner ATS-DLD pada kelompok pekerja Pasukan Orange sebagai populasi berisiko tinggi. Pendekatan tersebut diharapkan menghasilkan informasi yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara kualitas udara mikrobiologis dan status kesehatan respiratori sebagai dasar penyusunan strategi pengendalian bioaerosol pada lingkungan kerja petugas kebersihan perkotaan.

Melalui penelitian ini, evaluasi kualitas udara kerja akan dilakukan untuk mendeteksi bakteri patogen airborne dan menghubungkannya dengan status kesehatan respiratori pekerja. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya bukti ilmiah mengenai risiko mikrobiologis pada lingkungan kerja terbuka serta menjadi dasar penyusunan rekomendasi pengendalian bioaerosol berbasis bukti untuk mendukung implementasi program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) bagi petugas kebersihan perkotaan.[4,9,11]

2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang mengenai risiko paparan polutan biologis di lingkungan kerja, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1) Apakah tingkat konsentrasi bioaerosol bakteri (dalam satuan CFU/m³) pada lingkungan kerja Pasukan Orange telah melampaui standar keamanan kualitas udara yang berlaku?
2) Apa saja jenis bakteri patogen airborne yang terdeteksi di area tempat Pasukan Orange bekerja?
3) Apakah terdapat gangguan pada status kesehatan saluran pernapasan dan fungsi paru Pasukan Orange yang signifikan jika ditinjau dari hasil uji spirometri dan kuesioner ATS-DLD?
4) Apakah terdapat hubungan yang signifikan antara tingkat paparan bakteri di udara (bioaerosol) dengan penurunan fungsi paru (FEV1 dan FVC) pada Pasukan Orange?
5) Apakah terdapat hubungan yang signifikan antara tingkat paparan bakteri patogen airborne dengan timbulnya gejala respiratori pada kelompok pekerja tersebut?

3. Tujuan Penelitian

Tujuan Umum: Menganalisis risiko mikrobiologis akibat paparan bakteri airborne di lingkungan kerja serta mengevaluasi hubungannya dengan kesehatan respiratori Pasukan Orange sebagai dasar penyusunan rekomendasi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).

Tujuan Khusus:

1) Mengukur konsentrasi bakteri *airborne* (CFU/m³) pada lingkungan kerja Pasukan Orange menggunakan metode *active air sampling*.
2) Mengidentifikasi jenis bakteri patogen *airborne* yang terdeteksi pada lingkungan kerja Pasukan Orange melalui metode kultur dan identifikasi laboratorium.
3) Menilai status kesehatan respiratori Pasukan Orange menggunakan kuesioner American Thoracic Society–Division of Lung Diseases (ATS-DLD).
4) Mengevaluasi fungsi paru Pasukan Orange berdasarkan parameter Forced Vital Capacity (FVC), Forced Expiratory Volume in One Second (FEV_1), dan rasio FEV_1/FVC menggunakan pemeriksaan spirometri.

5) Menganalisis hubungan antara konsentrasi bakteri *airborne* dengan status kesehatan respiratori Pasukan Orange berdasarkan hasil pemeriksaan spirometri, kuesioner ATS-DLD, dan pemeriksaan leukosit.

4. Batasan Penelitian

Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, penelitian ini dibatasi pada aspek-aspek berikut.

1) **Subjek penelitian** terbatas pada personel Pasukan Orange yang bertugas sebagai petugas kebersihan jalan dan pengelola drainase dengan masa kerja minimal **6 bulan** serta memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan.
2) **Parameter mikrobiologis** difokuskan pada analisis bakteri *airborne* sebagai bioaerosol menggunakan metode kultur. Penelitian ini tidak mencakup analisis virus, jamur, maupun endotoksin.
3) **Metode pengambilan sampel udara** dilakukan menggunakan metode *active air sampling* dengan **air sampler** pada *breathing zone* (±1,5 meter dari permukaan tanah) untuk merepresentasikan udara yang dihirup pekerja.
4) **Metode identifikasi bakteri** dilakukan melalui kultur mikrobiologi disertai pengamatan karakteristik morfologi, pewarnaan Gram, dan uji biokimia hingga tingkat genus atau spesies sesuai kemampuan laboratorium.
5) **Lokasi penelitian** dibatasi pada area kerja Pasukan Orange yang memiliki potensi paparan bioaerosol tinggi, meliputi area pengelolaan sampah, drainase, dan titik kerja lain yang telah ditentukan sebagai lokasi pengambilan sampel.
6) **Evaluasi kesehatan respiratori** dibatasi pada penilaian gejala respiratori menggunakan kuesioner ***American Thoracic Society–Division of Lung Diseases (ATS-DLD)***, pemeriksaan fungsi paru melalui spirometri (FVC, FEV_1, dan rasio FEV_1/FVC), serta pemeriksaan jumlah leukosit sebagai indikator respons inflamasi.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

1. Konsep Bioaerosol dan Bakteri *Airborne*

Bioaerosol merupakan partikel biologis yang tersuspensi di udara yang berasal dari organisme hidup maupun produk metaboliknya, seperti bakteri, virus, jamur, spora, serbuk sari, endotoksin, mikotoksin, serta fragmen mikroorganisme lainnya. Bioaerosol dapat berada dalam bentuk sel tunggal maupun agregat partikel yang melayang di atmosfer dengan ukuran aerodinamis yang bervariasi, mulai dari kurang dari 1 µm hingga lebih dari 100 µm. Ukuran partikel tersebut sangat menentukan kemampuan bioaerosol untuk bertahan di

udara, berpindah bersama aliran udara, serta mencapai berbagai bagian saluran pernapasan manusia. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar kemampuannya untuk mencapai bronkiolus hingga alveolus paru sehingga meningkatkan risiko terjadinya gangguan kesehatan respiratori.[4,6,15]

Bakteri airborne merupakan salah satu komponen utama bioaerosol yang banyak ditemukan pada lingkungan dalam maupun luar ruangan. Keberadaan bakteri di udara dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain aktivitas manusia, kondisi ventilasi, suhu, kelembapan, kepadatan penghuni, serta keberadaan sumber kontaminasi biologis di lingkungan sekitar. Aktivitas manusia seperti berjalan, berbicara, batuk, bersin, maupun pelepasan partikel kulit (skin squames) diketahui menjadi salah satu sumber utama emisi bakteri ke udara. Selain itu, udara luar juga berkontribusi terhadap komposisi komunitas bakteri airborne melalui proses ventilasi dan infiltrasi udara.[11,16–18]

Paparan bioaerosol yang berlangsung secara terus-menerus dapat menimbulkan berbagai dampak kesehatan, terutama pada kelompok pekerja yang setiap hari berada pada lingkungan dengan tingkat kontaminasi biologis tinggi. Oleh karena itu, pemantauan kualitas udara mikrobiologis menjadi salah satu komponen penting dalam implementasi program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), khususnya pada lingkungan kerja dengan potensi paparan limbah organik dan drainase.[4,15,19]

2. Sumber Bakteri Patogen di Lingkungan Kerja Pengelolaan Limbah

Lingkungan kerja yang berkaitan dengan pengelolaan sampah, limbah domestik, dan drainase merupakan salah satu sumber utama pembentukan bioaerosol. Aktivitas seperti pengangkutan sampah, pembersihan saluran drainase, pengadukan limbah cair, maupun proses dekomposisi bahan organik dapat menyebabkan mikroorganisme berpindah dari media cair atau padat ke udara melalui proses aerosolization. Mikroorganisme tersebut kemudian dapat terhirup oleh pekerja sehingga meningkatkan risiko terjadinya infeksi maupun gangguan kesehatan respiratori.[4,6,17]

Selain berasal dari limbah, manusia juga merupakan sumber utama bioaerosol. Aktivitas bernapas, berbicara, batuk, bersin, maupun pelepasan fragmen kulit diketahui menghasilkan emisi berbagai bakteri yang kemudian terdispersi ke udara. Penelitian Hospodsky et al. menunjukkan bahwa tingkat okupansi ruangan memiliki hubungan yang erat dengan peningkatan konsentrasi bakteri airborne. Mikroorganisme yang sering ditemukan pada lingkungan dengan aktivitas manusia tinggi meliputi genus *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, serta berbagai bakteri Gram negatif yang berasal dari limbah domestik maupun lingkungan sekitar.[7,11,16,18]

Pada lingkungan pengelolaan limbah dan drainase, bakteri oportunistik yang sering ditemukan meliputi *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Escherichia coli*. Keberadaan *Escherichia coli* di udara sering digunakan sebagai indikator adanya kontaminasi fekal, sedangkan *Pseudomonas aeruginosa* banyak ditemukan pada lingkungan yang lembap dan kaya bahan organik. Kedua bakteri tersebut diketahui berpotensi menyebabkan infeksi oportunistik pada individu dengan daya tahan tubuh yang rendah maupun pada pekerja yang mengalami paparan dalam jangka waktu lama.[7,12]

Faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan relatif, intensitas cahaya matahari, kecepatan angin, serta sistem ventilasi juga memengaruhi kelangsungan hidup mikroorganisme di udara. Kondisi kelembapan tinggi dan ventilasi yang kurang memadai dapat meningkatkan konsentrasi bioaerosol sehingga memperbesar peluang inhalasi oleh pekerja.[19–21]

3. Dampak Kesehatan Saluran Pernapasan akibat Paparan Bioaerosol

Paparan bioaerosol merupakan salah satu faktor risiko penting yang berhubungan dengan gangguan kesehatan saluran pernapasan pada pekerja. Mikroorganisme yang terhirup dapat mengendap pada berbagai bagian saluran napas sesuai ukuran partikelnya. Partikel dengan diameter aerodinamis kurang dari 10 µm mampu mencapai bronkus dan bronkiolus, sedangkan partikel berukuran kurang dari 2,5 µm dapat menembus hingga alveolus sehingga meningkatkan risiko terjadinya inflamasi jaringan paru.[4,6,15]

Gangguan kesehatan akibat bioaerosol dapat berupa iritasi saluran napas, rinitis alergi, sinusitis, bronkitis, asma, hipersensitivitas pneumonitis, hingga infeksi paru. Selain mikroorganisme hidup, komponen dinding sel bakteri Gram negatif berupa endotoksin juga diketahui mampu memicu respons inflamasi sistemik, meningkatkan produksi sitokin proinflamasi, serta menyebabkan penurunan fungsi paru apabila paparan berlangsung secara kronis.[6,12,15]

Beberapa bakteri oportunistik yang banyak ditemukan pada lingkungan pengelolaan limbah antara lain:

- **Staphylococcus aureus**, yang dapat menyebabkan infeksi kulit, pneumonia, serta berbagai infeksi saluran pernapasan.
- **Pseudomonas aeruginosa**, bakteri Gram negatif yang sering ditemukan pada lingkungan lembap dan limbah cair serta berpotensi menyebabkan infeksi paru, terutama pada individu dengan sistem imun yang menurun.
- **Escherichia coli**, yang keberadaannya di udara menunjukkan adanya kontaminasi fekal dan berpotensi menyebabkan infeksi apabila terhirup bersama partikel bioaerosol.[7,12]

Penilaian dampak paparan bioaerosol terhadap kesehatan respiratori umumnya dilakukan melalui pemeriksaan fungsi paru menggunakan spirometri dan penilaian gejala respiratori menggunakan kuesioner standar American Thoracic Society–Division of Lung Diseases (ATS-DLD). Parameter spirometri yang paling sering digunakan meliputi Forced Vital Capacity (FVC), Forced Expiratory Volume in One Second (FEV1), dan rasio FEV1/FVC. Penurunan nilai parameter tersebut menunjukkan adanya gangguan ventilasi restriktif maupun obstruktif akibat paparan polutan udara di lingkungan kerja. Pemeriksaan spirometri telah distandardisasi oleh American Thoracic Society (ATS) dan European Respiratory Society (ERS) sehingga memiliki validitas dan reproduksibilitas yang tinggi dalam penelitian kesehatan kerja.[22]

4. Metodologi Evaluasi Kualitas Udara Mikrobiologis

Evaluasi kualitas udara mikrobiologis merupakan tahapan penting dalam penilaian risiko paparan bioaerosol di lingkungan kerja. Tujuan utama evaluasi ini adalah mengetahui konsentrasi mikroorganisme di udara, mengidentifikasi jenis mikroorganisme yang berpotensi patogen, serta menilai tingkat risiko kesehatan yang dapat ditimbulkan terhadap pekerja. Keakuratan hasil evaluasi sangat dipengaruhi oleh metode pengambilan sampel, media kultur yang digunakan, kondisi lingkungan saat sampling, serta teknik identifikasi mikroorganisme di laboratorium.[4,5,15]

Secara umum, metode pengambilan sampel bioaerosol dibedakan menjadi metode aktif (*active air sampling*) dan metode pasif (*passive air sampling*).

a. Active Air Sampling

Metode active air sampling merupakan metode yang paling banyak direkomendasikan dalam penelitian kualitas udara mikrobiologis karena mampu mengukur konsentrasi mikroorganisme secara kuantitatif berdasarkan volume udara yang diambil. Pada metode ini, udara dihisap menggunakan pompa atau *air sampler* menuju media kultur sehingga jumlah koloni bakteri dapat dihitung dalam satuan *Colony Forming Unit per meter kubik udara (CFU/m³)*. Metode ini memiliki sensitivitas, akurasi, dan reproduksibilitas yang lebih tinggi dibandingkan metode pasif sehingga sesuai digunakan pada penelitian kesehatan kerja dan analisis risiko paparan bioaerosol.[4,5,7,12,23]

Peralatan yang umum digunakan antara lain Andersen Cascade Impactor, Surface Air System (SAS), MAS-100 Air Sampler, impinger, maupun filter sampler. Pemilihan alat bergantung pada tujuan penelitian, jenis mikroorganisme yang akan dianalisis, serta kondisi lingkungan pengambilan sampel.[4,10,23]

b. Passive Air Sampling

Passive air sampling menggunakan media kultur terbuka (settle plate) yang ditempatkan pada lokasi tertentu selama periode waktu tertentu sehingga mikroorganisme yang berada di udara mengendap secara gravitasi pada permukaan media. Metode ini relatif sederhana, murah, dan mudah diaplikasikan, namun tidak mampu mengukur volume udara secara langsung sehingga hanya memberikan gambaran tingkat kontaminasi mikrobiologis secara semi-kuantitatif. Interpretasi hasil biasanya menggunakan Index of Microbial Air Contamination (IMA) atau rumus Omeliansky.[5]

Setelah proses sampling, identifikasi mikroorganisme dilakukan melalui kultur mikrobiologi, pengamatan morfologi koloni, pewarnaan Gram, dan uji biokimia. Perkembangan teknologi juga memungkinkan penggunaan metode molekuler seperti Polymerase Chain Reaction (PCR), quantitative PCR (qPCR), maupun analisis 16S rRNA sequencing untuk mendeteksi mikroorganisme yang tidak dapat tumbuh pada media kultur konvensional.[19,24]

5. Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Dinamika Bakteri di Udara

Konsentrasi bakteri airborne dipengaruhi oleh interaksi antara faktor lingkungan, karakteristik bangunan, aktivitas manusia, serta kondisi meteorologi. Faktor-faktor tersebut menentukan kemampuan mikroorganisme untuk bertahan hidup, berkembang biak, maupun tetap tersuspensi di udara sehingga memengaruhi tingkat paparan yang diterima pekerja.[4,7,20]

Suhu udara merupakan salah satu faktor yang memengaruhi pertumbuhan dan viabilitas mikroorganisme. Suhu yang relatif hangat dapat meningkatkan aktivitas metabolisme bakteri tertentu, sedangkan suhu ekstrem dapat menurunkan viabilitasnya. Selain itu, kelembapan relatif berperan penting dalam mempertahankan kelangsungan hidup bakteri di udara. Lingkungan dengan kelembapan tinggi cenderung meningkatkan daya tahan bioaerosol sehingga mikroorganisme dapat bertahan lebih lama sebelum mengalami inaktivasi.[16,20,21]

Ventilasi merupakan faktor utama yang menentukan kualitas udara. Sistem ventilasi yang baik mampu mengurangi konsentrasi bioaerosol melalui proses pengenceran (dilution) dan pergantian udara (air exchange), sedangkan ventilasi yang buruk menyebabkan akumulasi mikroorganisme di udara sehingga meningkatkan risiko inhalasi oleh pekerja.[9,13,14,20,21]

Selain faktor fisik, aktivitas manusia juga memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan konsentrasi bakteri airborne. Aktivitas berjalan, berbicara, batuk, bersin, maupun pelepasan fragmen kulit diketahui meningkatkan pelepasan mikroorganisme ke udara. Oleh karena itu, kepadatan penghuni dan intensitas aktivitas merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam evaluasi kualitas udara mikrobiologis.[11,16,18]

Pada lingkungan kerja pengelolaan sampah dan drainase, proses pengangkutan limbah, pengadukan air limbah, serta dekomposisi bahan organik menjadi sumber utama pembentukan bioaerosol. Aktivitas tersebut menyebabkan bakteri berpindah dari media cair atau padat menuju udara sehingga meningkatkan risiko paparan bagi pekerja yang berada di sekitar lokasi.[4,6,15]

6. Standar Kualitas Udara Mikrobiologis

Hingga saat ini belum terdapat standar internasional yang secara universal menetapkan ambang batas konsentrasi bakteri udara untuk seluruh jenis lingkungan kerja. Penilaian kualitas udara mikrobiologis umumnya mempertimbangkan karakteristik bangunan, fungsi ruangan, tingkat okupansi, sistem ventilasi, serta keberadaan sumber pencemar biologis. Berbagai organisasi internasional lebih menekankan pengendalian sumber pencemar, ventilasi yang memadai, pengaturan kelembapan, dan pemeliharaan sistem ventilasi dibandingkan penetapan satu nilai ambang baku untuk seluruh kondisi lingkungan.[13,14,20]

Dalam penelitian mikrobiologi lingkungan, konsentrasi bakteri udara biasanya dinyatakan dalam satuan Colony Forming Unit per meter kubik udara (CFU/m^3). Nilai tersebut kemudian diinterpretasikan bersama kondisi lingkungan, jenis bakteri yang teridentifikasi, serta karakteristik aktivitas pada lokasi penelitian sehingga dapat memberikan gambaran tingkat risiko paparan secara lebih komprehensif.[4,5,15]

7. Pemeriksaan Fungsi Paru Menggunakan Spirometri

Spirometri merupakan metode baku yang digunakan untuk mengevaluasi fungsi ventilasi paru secara objektif. Pemeriksaan ini mengukur volume dan kecepatan aliran udara selama inspirasi maupun ekspirasi maksimal sehingga mampu mendeteksi gangguan ventilasi restriktif maupun obstruktif secara dini. Spirometri telah menjadi standar pemeriksaan fungsi paru dalam pelayanan kesehatan maupun penelitian kesehatan kerja karena memiliki validitas dan reproduksibilitas yang tinggi apabila dilakukan sesuai pedoman American Thoracic Society (ATS) dan European Respiratory Society (ERS).

Parameter utama yang diukur meliputi Forced Vital Capacity (FVC), Forced Expiratory Volume in One Second (FEV1), serta rasio FEV1/FVC. Penurunan nilai FVC umumnya menunjukkan gangguan ventilasi restriktif, sedangkan penurunan rasio FEV1/FVC mengindikasikan gangguan ventilasi obstruktif. Pemeriksaan ini banyak digunakan untuk mengevaluasi dampak paparan debu, asap, maupun bioaerosol terhadap kesehatan paru pekerja sehingga menjadi indikator objektif dalam analisis risiko kesehatan kerja.[22,25]

Dalam penelitian ini, pemeriksaan spirometri digunakan untuk menilai status fungsi paru Pasukan Orange sehingga hasilnya dapat dianalisis hubungannya dengan tingkat paparan bakteri airborne di lingkungan kerja.

8. **Penilaian Gejala Respiratori Menggunakan Kuesioner ATS-DLD**

   Selain pemeriksaan spirometri, evaluasi kesehatan respiratori dilakukan menggunakan American Thoracic Society–Division of Lung Diseases (ATS-DLD) Questionnaire. Instrumen ini merupakan kuesioner epidemiologi yang telah digunakan secara luas dalam penelitian kesehatan kerja dan kesehatan lingkungan untuk mengidentifikasi gejala gangguan saluran pernapasan kronis.

   Kuesioner ATS-DLD mencakup berbagai indikator, antara lain batuk kronis, produksi sputum, mengi (*wheezing*), sesak napas, riwayat penyakit paru, riwayat merokok, riwayat pekerjaan, serta faktor risiko lain yang berkaitan dengan gangguan respiratori. Instrumen ini telah digunakan secara luas karena memiliki validitas yang baik dalam menilai gejala respiratori pada populasi pekerja maupun masyarakat umum.

   Kombinasi pemeriksaan spirometri dan kuesioner ATS-DLD memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai status kesehatan respiratori karena menggabungkan data subjektif berupa keluhan pernapasan dengan data objektif berupa hasil pemeriksaan fungsi paru. [22,25]

9. **Standar dan Ambang Batas Aman**

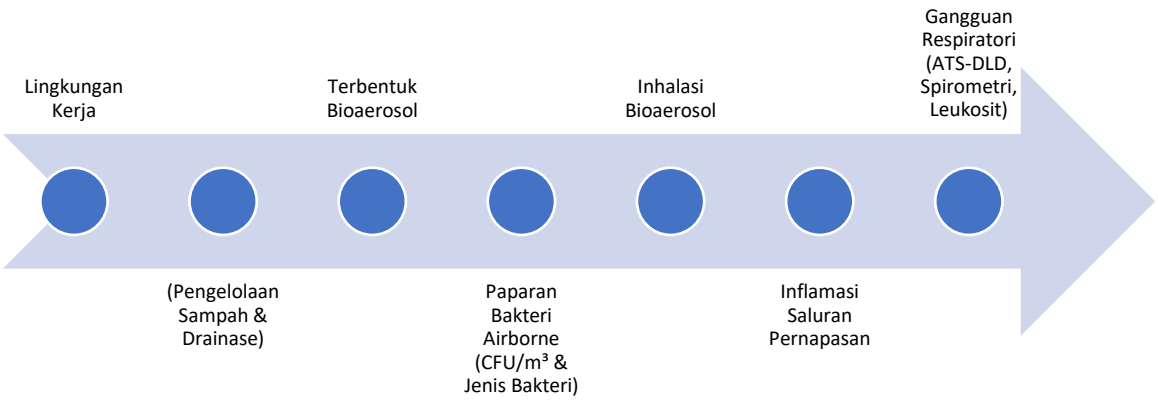
   Hingga saat ini, belum ada standar global yang tunggal untuk ambang batas bioaerosol bakteri di lingkungan kerja umum. Namun, beberapa otoritas seperti WHO dan ACGIH telah memberikan panduan umum terkait kualitas udara dalam ruangan. Konsentrasi bakteri udara sebesar 10^3 CFU/m^3 sering kali dianggap sebagai batas maksimal keamanan untuk lingkungan kerja yang sehat. Melampaui batas ini dianggap sebagai sinyal peringatan adanya masalah lingkungan yang memerlukan intervensi K3, seperti perbaikan sanitasi atau penggunaan alat pelindung diri.

10. Kerangka Teori

Paparan bioaerosol di lingkungan kerja merupakan salah satu faktor risiko terjadinya gangguan kesehatan saluran pernapasan pada pekerja. Bioaerosol yang mengandung bakteri patogen dapat berasal dari aktivitas pengelolaan sampah, drainase, maupun limbah organik. Mikroorganisme yang tersuspensi di udara dapat terhirup hingga mencapai saluran pernapasan bawah, terutama apabila berukuran respirabel (1–10 µm). Paparan yang berlangsung secara terus-menerus berpotensi menimbulkan proses inflamasi, reaksi alergi, infeksi saluran pernapasan, serta penurunan fungsi paru.

Besarnya risiko gangguan kesehatan tidak hanya dipengaruhi oleh konsentrasi bakteri udara dan jenis bakteri patogen yang terdapat di lingkungan kerja, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor individu pekerja, seperti umur, masa kerja, kebiasaan merokok, penggunaan alat pelindung diri (APD), serta kondisi lingkungan kerja seperti suhu dan kelembapan. Oleh karena itu, evaluasi risiko mikrobiologis perlu dilakukan secara komprehensif melalui pengukuran konsentrasi bakteri udara, identifikasi bakteri patogen, serta pemeriksaan status kesehatan respiratori pekerja menggunakan kuesioner ATS-DLD, spirometri, dan pemeriksaan leukosit.

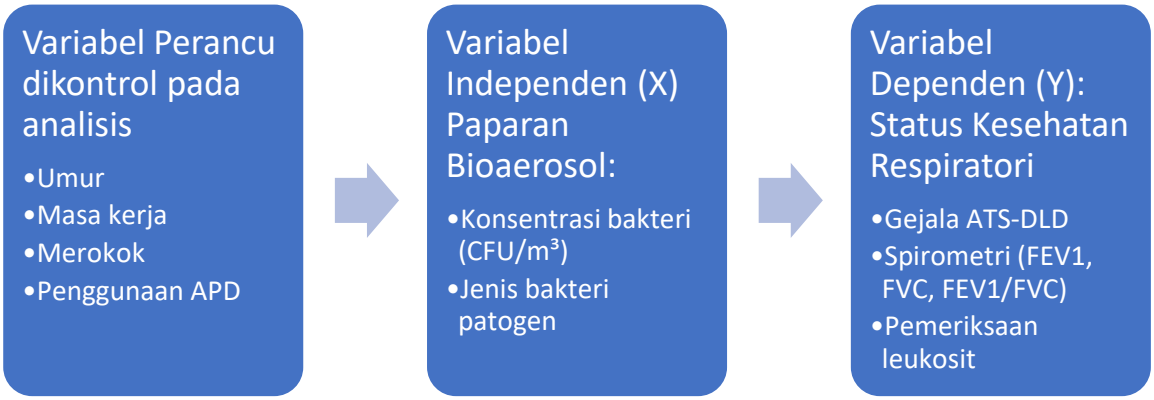
Berdasarkan teori tersebut, penelitian ini mengasumsikan bahwa semakin tinggi paparan bioaerosol bakteri di lingkungan kerja, maka semakin besar risiko terjadinya gangguan kesehatan saluran pernapasan pada Pasukan Orange.



Gambar 1. Bagan Kerangka Teori

11. Kerangka Konsep

Kerangka konsep penelitian ini menggambarkan hubungan antara paparan bioaerosol bakteri di lingkungan kerja dengan status kesehatan saluran pernapasan Pasukan Orange. Variabel independen dalam penelitian ini adalah paparan bioaerosol yang diukur berdasarkan konsentrasi bakteri udara (CFU/m³) dan keberadaan bakteri patogen hasil identifikasi kultur. Variabel dependen adalah status kesehatan respiratori yang dinilai melalui gejala pernapasan menggunakan kuesioner ATS-DLD, fungsi paru berdasarkan hasil spirometri, serta pemeriksaan leukosit. Hubungan tersebut dipengaruhi oleh beberapa variabel karakteristik individu yang berpotensi menjadi faktor perancu, seperti umur, masa kerja, kebiasaan merokok, dan kepatuhan penggunaan APD.



Gambar 2. Bagan Kerangka Konsep

12. Hipotesis

Hipotesis Umum

Terdapat hubungan antara paparan bioaerosol bakteri di lingkungan kerja dengan gangguan kesehatan saluran pernapasan pada Pasukan Orange.

Hipotesis Khusus

H1. Terdapat hubungan antara konsentrasi bakteri airborne (CFU/m³) dengan gangguan kesehatan saluran pernapasan pada Pasukan Orange.

H2. Terdapat hubungan antara keberadaan bakteri patogen airborne dengan gangguan fungsi paru berdasarkan hasil pemeriksaan spirometri pada Pasukan Orange.

H3. Pasukan Orange yang bekerja pada area dengan paparan bioaerosol tinggi memiliki risiko lebih besar mengalami gangguan kesehatan saluran pernapasan dibandingkan pekerja pada area dengan paparan bioaerosol rendah.

H4. Paparan bioaerosol bakteri merupakan faktor risiko terjadinya gangguan kesehatan saluran pernapasan setelah dikontrol oleh faktor umur, masa kerja, kebiasaan merokok, dan penggunaan alat pelindung diri (APD).

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

a. Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian observasional analitik dengan pendekatan cross-sectional. Penelitian bertujuan menganalisis hubungan antara paparan bakteri airborne di lingkungan kerja dengan gangguan kesehatan saluran pernapasan pada petugas kebersihan perkotaan (Pasukan Orange). Pengukuran kualitas udara mikrobiologis dan pemeriksaan kesehatan responden dilakukan pada waktu yang sama.

b. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama 6–10 bulan yang meliputi tahap persiapan, pengambilan sampel udara, pemeriksaan kesehatan responden, analisis laboratorium, pengolahan data, hingga penyusunan laporan penelitian.

Penelitian dilakukan pada:

1) Area kerja Pasukan Orange yang meliputi lokasi pengelolaan sampah dan drainase.
2) Laboratorium Mikrobiologi untuk identifikasi bakteri hasil pengambilan sampel udara.
3) Lokasi pemeriksaan kesehatan untuk pelaksanaan spirometri dan pengisian kuesioner ATS-DLD.

c. Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi penelitian adalah seluruh petugas Pasukan Orange yang bekerja pada lokasi penelitian sebanyak 130 orang. Teknik pengambilan sampel menggunakan Total Sampling, sehingga seluruh anggota populasi yang memenuhi kriteria inklusi dan tidak memenuhi kriteria eksklusi akan dijadikan responden penelitian. Meskipun demikian, besar sampel minimal tetap dihitung menggunakan rumus *Lemeshow* untuk populasi terbatas sebagai pembanding metodologis.

Perhitungan dilakukan menggunakan rumus *Lemeshow* untuk populasi terbatas sebagai berikut:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

dengan:

N = 130

Z = 1,96

p = 0,394

q = 0,606

d = 0,05

Sehingga diperoleh:

n = 96,18 ≈ 97 responden

Dengan penambahan antisipasi drop out sebesar 10%:

$$n = \frac{97}{0,9} \approx 108$$

Meskipun jumlah minimal sampel sebanyak 108 responden, penelitian ini menggunakan Total Sampling, sehingga seluruh 130 petugas Pasukan Orange akan diikutsertakan dalam penelitian.

d. Kriteria Responden

Kriteria Inklusi

Responden yang memenuhi seluruh kriteria berikut akan diikutsertakan dalam penelitian:

1. Petugas Pasukan Orange yang bertugas pada lokasi penelitian.
2. Berusia ≥18 tahun.
3. Masa kerja minimal enam bulan.
4. Bersedia mengikuti penelitian dengan menandatangani informed consent.

Kriteria Eksklusi

Responden tidak diikutsertakan apabila:

1. Mengalami infeksi saluran napas akut dalam 14 hari terakhir.
2. Memiliki riwayat PPOK, asma, fibrosis paru, bronkiektasis, atau penyakit paru kronik lainnya.
3. Memiliki kontraindikasi pemeriksaan spirometri.
4. Tidak mampu melakukan manuver spirometri secara benar.
5. Tidak mengisi kuesioner secara lengkap.
6. Tidak hadir selama proses pengambilan data.

3. Variabel Penelitian

Variabel Independen

Paparan bakteri airborne yang diukur berdasarkan:

- Konsentrasi bakteri udara (CFU/m³)
- Jenis bakteri patogen yang teridentifikasi

Variabel Dependen

Status kesehatan respiratori yang meliputi:

- Gangguan fungsi paru (FEV1, FVC, FEV1/FVC)
- Gejala respiratori berdasarkan ATS-DLD

Variabel Perancu

- Umur
- Jenis kelamin
- Masa kerja
- Kebiasaan merokok
- Penggunaan APD
- Riwayat penyakit

e. Teknik Pengambilan Sampel Udara

Pengambilan sampel udara dilakukan menggunakan metode Active Air Sampling dengan air sampler.

Sebanyak lima titik pengambilan sampel ditentukan berdasarkan arah mata angin, yaitu:

- Utara
- Selatan
- Timur
- Barat
- Tengah

Air sampler ditempatkan pada breathing zone (±1,5 meter dari permukaan tanah) untuk merepresentasikan udara yang dihirup pekerja.

Volume udara yang diambil ditetapkan sebesar 1 m³ udara pada setiap titik sesuai kapasitas alat.

Media kultur yang digunakan adalah Nutrient Agar (NA).

Media kemudian diinkubasi pada suhu 37°C selama 24–48 jam sebelum dilakukan perhitungan koloni.

Hasil dinyatakan sebagai CFU/m³ udara.

f. Identifikasi Bakteri

Koloni bakteri yang tumbuh pada media Nutrient Agar dihitung dan diidentifikasi menggunakan:

- karakteristik morfologi koloni,

- pewarnaan Gram,
- uji biokimia standar,

hingga tingkat genus atau spesies apabila memungkinkan.

Fokus identifikasi diarahkan pada bakteri oportunistik, antara lain:

- *Staphylococcus aureus*
- *Pseudomonas aeruginosa*
- *Escherichia coli*
- *Klebsiella pneumoniae*

g. Pemeriksaan Kesehatan Respiratori

Penilaian kesehatan respiratori dilakukan melalui:

1. Kuesioner ATS-DLD

Digunakan untuk mengidentifikasi:

- batuk kronis
- dahak
- sesak napas
- mengi
- riwayat penyakit respiratori

2. Pemeriksaan Spirometri

Parameter yang diukur:

- FVC
- FEV1
- Rasio FEV1/FVC

Hasil diklasifikasikan menjadi:

- Normal
- Restriksi
- Obstruksi
- Mixed

h. Klasifikasi Paparan

Paparan bakteri airborne dikelompokkan menjadi:

Paparan Tinggi

- Konsentrasi bakteri > median dan/atau
- ditemukan bakteri patogen.

Paparan Rendah

- Konsentrasi ≤ median serta

- tidak ditemukan bakteri patogen.

i. Analisis Data

Analisis Univariat

Analisis univariat digunakan untuk menggambarkan distribusi masing-masing variabel penelitian. Variabel kategorik disajikan dalam bentuk frekuensi dan persentase.

Variabel numerik disajikan dalam bentuk rerata ± simpangan baku apabila berdistribusi normal atau median (minimum–maksimum) apabila tidak berdistribusi normal.

Analisis Bivariat

Hubungan antara paparan bakteri airborne dengan gangguan respiratori dianalisis menggunakan:

- Uji Chi-square apabila memenuhi syarat.
- Fisher Exact Test apabila terdapat expected count <5.

Hasil analisis disajikan dalam bentuk:

- nilai p
- Odds Ratio (OR)
- 95% Confidence Interval (95% CI)

Nilai p <0,05 dianggap bermakna secara statistik.

Analisis Multivariat

Variabel dengan nilai p <0,25 pada analisis bivariat dimasukkan ke dalam model Regresi Logistik Biner untuk memperoleh faktor risiko yang paling berpengaruh terhadap gangguan kesehatan respiratori.

Hasil analisis dilaporkan sebagai:

j. Alur Penelitian

Penelitian diawali dengan tahap persiapan penelitian**,** yang meliputi penyusunan proposal, studi literatur, penyusunan instrumen penelitian, pengurusan izin penelitian, serta kalibrasi alat yang akan digunakan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan seluruh prosedur penelitian dapat dilaksanakan sesuai dengan kaidah ilmiah dan etika penelitian.

Selanjutnya dilakukan penentuan lokasi sampling pada lima titik pengambilan sampel yang mewakili kondisi lingkungan kerja Pasukan Orange, yaitu titik Utara, Selatan, Timur, Barat, dan Tengah**.** Penentuan lokasi dilakukan untuk memperoleh gambaran sebaran bakteri airborne pada area kerja yang memiliki karakteristik paparan berbeda.

Tahap berikutnya adalah pengambilan sampel udara menggunakan metode *Active Air Sampling*. Sampel udara diambil pada zona pernapasan pekerja (*breathing zone*) dengan

volume udara tertentu menggunakan *air sampler*. Sampel kemudian diinokulasikan pada media kultur steril dan dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pemeriksaan lebih lanjut.

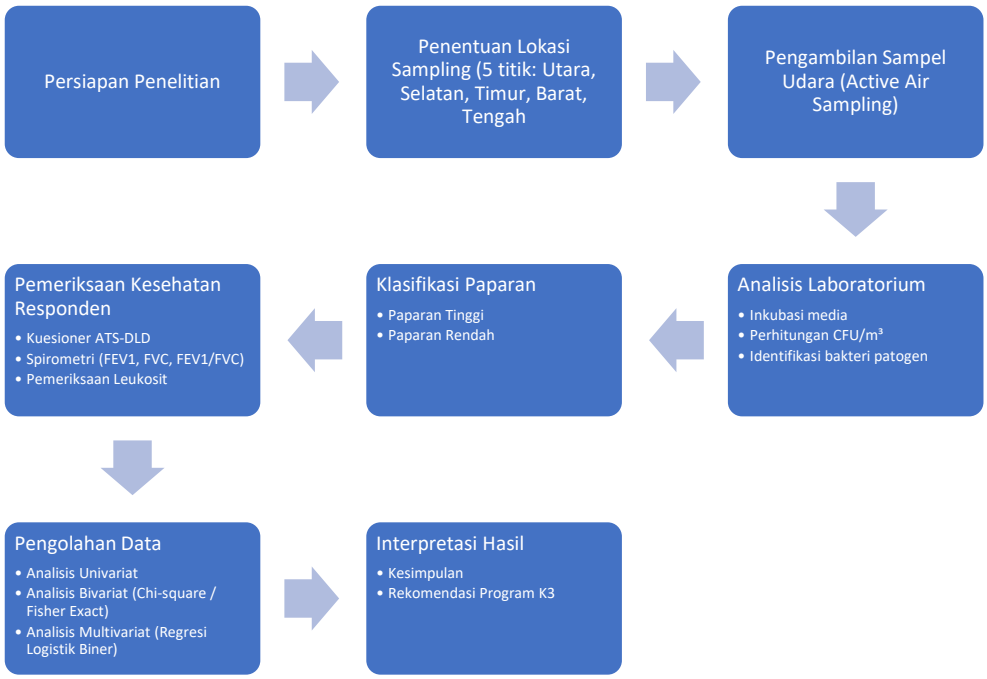
Pada tahap analisis laboratorium, media kultur diinkubasi selama 24–48 jam, kemudian dilakukan perhitungan jumlah koloni bakteri yang dinyatakan dalam satuan *Colony Forming Unit per meter kubik udara (CFU/m³).* Selanjutnya dilakukan identifikasi bakteri berdasarkan karakteristik morfologi koloni, pewarnaan Gram, dan uji biokimia untuk mengetahui keberadaan bakteri patogen yang berpotensi menyebabkan gangguan kesehatan.

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, dilakukan klasifikasi tingkat paparan menjadi kelompok paparan tinggi dan paparan rendah. Pengelompokan dilakukan berdasarkan konsentrasi bakteri udara (CFU/m³) serta keberadaan bakteri patogen yang teridentifikasi pada masing-masing lokasi penelitian.

Selanjutnya dilakukan pemeriksaan kesehatan responden yang meliputi pengisian kuesioner ATS-DLD untuk menilai gejala respiratori, pemeriksaan fungsi paru menggunakan spirometri dengan parameter FEV_1, FVC, dan rasio FEV_1/FVC, serta **p**emeriksaan jumlah leukosit sebagai indikator respons inflamasi akibat paparan mikroorganisme.

Data yang diperoleh kemudian memasuki tahap pengolahan dan analisis data. Analisis univariat dilakukan untuk mendeskripsikan karakteristik responden dan distribusi masing-masing variabel penelitian. Selanjutnya dilakukan analisis bivariat menggunakan uji *Chi-square* atau *Fisher Exact Test* untuk mengetahui hubungan antara paparan bakteri airborne dengan gangguan kesehatan saluran pernapasan. Variabel yang memenuhi kriteria kemudian dianalisis menggunakan regresi logistik biner untuk memperoleh faktor-faktor yang berpengaruh secara independen terhadap gangguan kesehatan respiratori.

Tahap terakhir adalah interpretasi hasil penelitian, yaitu menginterpretasikan seluruh hasil analisis statistik untuk menarik kesimpulan mengenai hubungan antara kualitas udara mikrobiologis dengan kesehatan saluran pernapasan Pasukan Orange. Berdasarkan hasil tersebut disusun rekomendasi pengendalian bioaerosol dan implementasi program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) sebagai upaya pencegahan penyakit akibat kerja pada petugas kebersihan perkotaan.



Gambar 3. Alur Penelitian

k. Indikator Capaian Penelitian

Luaran penelitian yang diharapkan meliputi:

1. Data konsentrasi bakteri airborne (CFU/m³) pada lingkungan kerja Pasukan Orange.
2. Identifikasi jenis bakteri patogen yang terdapat di udara lingkungan kerja.
3. Profil status kesehatan respiratori petugas berdasarkan hasil spirometri dan kuesioner ATS-DLD.
4. Model hubungan antara paparan bioaerosol dengan gangguan kesehatan saluran pernapasan.
5. Rekomendasi pengendalian bioaerosol sebagai dasar penyusunan program Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) bagi petugas kebersihan perkotaan.

BAB 4 & 5. JADWAL DAN ANGGARAN

Jadwal Kegiatan Penelitian (12 Bulan)

Pelaksanaan penelitian direncanakan selama 12 bulan yang terbagi dalam lima tahapan utama, yaitu tahap persiapan, pengumpulan data, analisis laboratorium, analisis data, serta pelaporan dan diseminasi luaran. Pada bulan pertama dilakukan studi pustaka dan penyusunan proposal penelitian. Selanjutnya pada bulan kedua dilaksanakan pengurusan izin penelitian dan persetujuan etik (*ethical approval*), sedangkan pada bulan ketiga dilakukan kalibrasi alat penelitian, meliputi pompa *air sampling* dan spirometer, serta *pilot study* dan survei lokasi kerja Pasukan Orange untuk menentukan titik pengambilan sampel. Tahap pengumpulan data

dilaksanakan pada bulan keempat hingga keenam, meliputi pengambilan sampel udara menggunakan metode *active air sampling*, penyebaran kuesioner American Thoracic Society–Division of Lung Diseases (ATS-DLD), serta pemeriksaan fungsi paru menggunakan spirometri. Sampel udara yang diperoleh kemudian dianalisis di laboratorium melalui proses kultur bakteri dan penghitungan jumlah koloni (CFU/m^3) selama bulan kelima hingga ketujuh, dilanjutkan dengan identifikasi bakteri patogen menggunakan pewarnaan Gram dan uji biokimia pada bulan ketujuh hingga kedelapan. Tahap analisis data dilaksanakan pada bulan kedelapan hingga kesembilan melalui tabulasi data, analisis statistik menggunakan uji bivariat dan regresi logistik, serta interpretasi hubungan antara kualitas udara mikrobiologis dengan kesehatan respiratori pekerja. Pada tahap akhir, yaitu bulan kesepuluh hingga kedua belas, dilakukan penyusunan laporan kemajuan dan laporan akhir penelitian, finalisasi pedoman praktis Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) mengenai pengendalian bioaerosol bagi petugas kebersihan perkotaan, serta penyusunan dan pengiriman artikel ilmiah ke jurnal terakreditasi sebagai luaran publikasi penelitian.

Tabel 1. Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan Ke-											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	**Tahap Persiapan**												
	Studi pustaka & penyusunan proposal	XXX											
	Pengurusan izin penelitian & persetujuan etik (*Ethical Approval*)		XXX										
	Kalibrasi alat (pompa sampling & spirometer)			XXX									
	Pilot Study & survei lokasi kerja Pasukan Orange			XXX									
2	**Tahap Pengumpulan Data**												

No	Kegiatan	Bulan Ke-											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Pengambilan sampel udara aktif (Bioaerosol)				XXX	XXX	XXX						
	Penyebaran kuesioner ATS-DLD kepada pekerja				XXX	XXX	XXX						
	Pelaksanaan uji spirometri (fungsi paru)				XXX	XXX	XXX						
3	**Tahap Analisis Laboratorium**												
	Kultur bakteri & penghitungan koloni (CFU/m³)					XXX	XXX	XXX					
	Identifikasi jenis bakteri patogen (uji biokimia/pengecatan)							XXX	XXX				
4	**Tahap Analisis Data**												
	Tabulasi data & pengolahan statistik (Korelasi & Regresi)									XXX	XXX		
	Interpretasi hubungan kualitas udara & kesehatan respiratori										XXX		
5	**Tahap Pelaporan & Luaran**												
	Penyusunan laporan kemajuan & akhir											XXX	

No	Kegiatan	Bulan Ke-											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Finalisasi Pedoman Praktis K3 Pengendalian Bioaerosol											XXX	XXX
	Submit artikel ke jurnal ilmiah												XXX

Bab 5 Anggaran

RINCIAN USULAN RAB

Judul Penelitian	: Analisis Risiko Mikrobiologis: Deteksi Bakteri Airbone Patogen di Lingkungan Kerja dan Hubungannya dengan Kesehatan Saluran Pernapasan
Fokus Penelitian	: *Green healthy Life*
Ketua Tim Peneliti	: dr Jihan Samira, M.PdKed, SpMK
Mitra Penelitian	: PR Biomedis BRIN
Total Usulan Waktu	: 9 Bulan
Pendanaan	**94.450.000**

No		Komponen Biaya Riset/Aktivitas Riset/Justifikasi Kebutuhan	Indikator Kinerja Riset/Luaran	Volume	Frekuensi	Harga Satuan (Rp)	Satuan	Sub Total
I. BIAYA LANGSUNG - minimum 75% dari Total Biaya								
A. BIAYA LANGSUNG PERSONIL - Maksimum 20% dari Total Pendanaan								
Gaji/Upah/Honorarium								
	1	dr. Jihan Samira, M.Pd.Ked, Sp.MK, peneliti pemula (1 jam x 4mg x 7 bulan)	Laporan final, HKI	1	30	100.000	OJ	3.000.000
	2	dr. Arleen Devita, peneliti pemula (1 jam x 2mg x 7 bulan)	Laporan Final, paper	1	14	100.000	OJ	1.400.000
	3	dr. Ida Effendi, Sp.MK, peneliti pemula (1 jam x 2mg x 7 bulan)	Laporan Final, paper	1	7	100.000	OJ	700.000
	4	dr. Isa Bella, Sp.MK, peneliti pemula (1 jam x 2mg x 7 bulan)	Laporan Final, paper	1	7	100.000	OJ	700.000
	5	Narasumber Prof.Dr.dr. Pusparini, Sp.PK	Bimbingan dan arahan	1	2	1.500.000	OJ	3.000.000
	6	Pembantu Peneliti (2 jam x 4 mgg x 7 bulan)	Laporan Final, paper	1	51	25.000	OJ	1.275.000
Sub Total I.A								10.075.000

B. BIAYA LANGSUNG NON PERSONIL								
B. 1	Pengadaan Bahan/peralatan Produksi/Sewa Alat							
B. 1. 1	Kegiatan A	Pengadaan Bahan Habis	Indikator Kinerja Riset/ Luaran	Volume	Frekuensi	Harga Satuan (Rp)	Satuan	Sub Total
	1	Alkohol 70%	Bahan berfungsi	1	3	80.000	unit	240.000
	2	Pemeriksaan leukosit (Prodia)	Bahan berfungsi	1	130	52.000	unit	6.760.000
	3	Pemeriksaan kultur bakteri	Bahan berfungsi	1	50	1.200.000	unit	60.000.000
	4	pemeriksaan air sampler 10 titik	Bahan berfungsi	1	10	800.000	unit	8.000.000
	5							
	6							
	7							
								-
	Sub Total B. 1. 1							75.000.000
Sub Total I. B. 1								75.000.000

B.2	Perjalanan, Transportasi							
	1	dr. Jihan Samira, M.PdKed, Sp.MK	Sampai di tujuan	1	25	75.000	OH	1.875.000
	2	dr. Arleen Devita, Sp.MK	Sampai di tujuan	1	25	75.000	OH	1.875.000
	3	dr. ida Effendi, Sp.MK	Sampai di tujuan	1	20	75.000	OH	1.500.000
	4	dr. Isa Bella, Sp.MK	Sampai di tujuan	1	20	75.000	OH	1.875.000
	5	Tendik	Sampai di tujuan	1	25	60.000	OH	1.500.000
	6	Mahasiswa	Sampai di tujuan	1	15	50.000	OH	750.000
	Sub Total B. 2							9.375.000
Sub Total I. B. 2								**9.375.000**
Sub Total I. B								84.375.000
TOTAL I (BIAYA LANGSUNG) - Minimum 75% dari Total Biaya								**94.450.000**

URAIAN BIAYA TIDAK LANGSUNG BERDASARKAN AKTIVITAS

II	**BIAYA TIDAK LANGSUNG - Maksimum 25% dari Total Biaya**							
A.	Kegiatan A	Laporan, Seminar, dan Publikasi						
	1	HKI	Bahan berfungsi	1	1	200.000	unit	200.000
	2	Materai	Bahan berfungsi	1	5	10.000	lembar	50.000
	3	analisis statistik	Bahan berfungsi	1	1	2.000.000	OJ	2.000.000
	4	Kaji etik	Bahan berfungsi	1	1	1.500.000	OJ	1.500.000
	5	Inpu data	Bahan berfungsi	1	1	1.500.000	OJ	1.500.000
	5	Foto copy dan ATK	Bahan berfungsi	1	300	1.000	lembar	300.000
	Sub Total II A							**5.550.000**
B.	Kegiatan B	Forum Group Disscusion						
	1							-
	2							-
	3							-
	Sub Total II B							**-**
TOTAL II (BIAYA TIDAK LANGSUNG) - Maksimum 25% dari Total Biaya								**5.550.000**

TOTAL BIAYA (I + II)	**100.000.000**

DAFTAR PUSTAKA

[1] Organization WH, Organization IL. WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury, 2000-2016: Global Monitoring Report. Geneva: World Health Organization; 2021.

[2] Indonesia KKR. Profil Kesehatan Indonesia 2024. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; 2025.

[3] Kesehatan BKP. Laporan Tematik Survei Kesehatan Indonesia Tahun 2023: Potret Kesehatan Indonesia. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; 2024.

[4] Chawla H, Anand P, Garg K, Bhagat N, Varmani SG, Bansal T, et al. A comprehensive review of microbial contamination in the indoor environment: sources, sampling, health risks, and mitigation strategies. Front Public Heal 2023;11:1–25. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1285393.

[5] Viani I, Colucci ME, Pergreffi M, Rossi D, Veronesi L, Bizzarro A, et al. Passive air sampling: The use of the index of microbial air contamination. Acta Biomed 2020;91:92–105. https://doi.org/10.23750/abm.v91i3-S.9434.

[6] Srikanth P, Sudharsanam S, Steinberg R. Bio-aerosols in indoor environment: composition, health effects and analysis. Indian J Med Microbiol 2008;26:302–12. https://doi.org/10.4103/0255-0857.43555.

[7] Lee H, Lee BG, Kim YJ, Shim JE, Yeo MK. Assessment of airborne bacteria in the indoor of public-use facilities concentrated on influencing factors and opportunistic pathogenic bacteria. Air Qual Atmos Heal 2024;17:1725–38. https://doi.org/10.1007/s11869-024-01540-3.

[8] Wartayasa IK. Pelaksanaan Upacara Yadnya Sebagai Implementasi Peningkatan Dan Pengamalan Nilai Ajaran Agama Hindu. Kamaya J Ilmu Agama, 1(3), 2018;1:186–99.

[9] Correia G, Calheiros D, Rosa N, Rodrigues L, Cunha S, Santiago LM, et al. Indoor air quality and airborne transmission under the One Health lens: A scoping review. One Heal 2025;21. https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2025.101160.

[10] Nguyen TT, Johnson GR, Bell SC, Knibbs LD. A Systematic Literature Review of Indoor Air Disinfection Techniques for Airborne Bacterial Respiratory Pathogens. Int J Environ Res Public Health 2022;19. https://doi.org/10.3390/ijerph19031197.

[11] Hospodsky D, Qian J, Nazaroff WW, Yamamoto N, Bibby K, Rismani-Yazdi H, et al. Human occupancy as a source of indoor airborne bacteria. PLoS One 2012;7. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034867.

[12] Meelad FMA, Mohammed AA, Bareebash SAM. مولعلل قورافلا قلجم Assessment of

microbial risks in the air of the Faculty of Engineering in Sabratha and its impact on health and safety 2026;2:124–39.

[13] Standard A. Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE Stand 2004;2019.

[14] Ding E, Zhang D, Bluyssen PM. Ventilation regimes of school classrooms against airborne transmission of infectious respiratory droplets: A review. Build Environ 2022;207:108484. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108484.

[15] Kumar P, Kausar MA, Singh AB, Singh R. Biological contaminants in the indoor air environment and their impacts on human health. Air Qual Atmos Heal 2021;14:1723–36. https://doi.org/10.1007/s11869-021-00978-z.

[16] Meadow JF, Altrichter AE, Kembel SW, Kline J, Mhuireach G, Moriyama M, et al. Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source. Indoor Air 2014;24:41–8. https://doi.org/10.1111/ina.12047.

[17] Prussin AJ, Marr LC. Sources of airborne microorganisms in the built environment. Microbiome 2015;3:78. https://doi.org/10.1186/s40168-015-0144-z.

[18] Adams RI, Bhangar S, Pasut W, Arens EA, Taylor JW, Lindow SE, et al. Chamber bioaerosol study: Outdoor air and human occupants as sources of indoor airborne microbes. PLoS One 2015;10:133221. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128022.

[19] Gilbert JA, Hartmann EM. The indoors microbiome and human health. Nat Rev Microbiol 2024;22:742–55. https://doi.org/10.1038/s41579-024-01077-3.

[20] Branco PTBS, Sousa SIV, Dudzińska MR, Ruzgar DG, Mutlu M, Panaras G, et al. A review of relevant parameters for assessing indoor air quality in educational facilities. Environ Res 2024;261. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119713.

[21] Sadrizadeh S, Yao R, Yuan F, Awbi H, Bahnfleth W, Bi Y, et al. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. J Build Eng 2022;57:104908. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908.

[22] Graham BL, Steenbruggen I, Barjaktarevic IZ, Cooper BG, Hall GL, Hallstrand TS, et al. Standardization of spirometry 2019 update an official American Thoracic Society and European Respiratory Society technical statement. Am J Respir Crit Care Med 2019;200:E70–88. https://doi.org/10.1164/rccm.201908-1590ST.

[23] Andrews R, O'Connor P-F. NIOSH Manual de Métodos Analíticos (NMAM). Inst Nac Para La Segur y Salud Ocup Div Ciencias Físicas e Ing 2020;1:1–935.

[24] Wang H-M, Lee S-Z, Fu L-M. Microfluidic and Paper-Based Recombinase Polymerase Amplification Systems for Decentralized Diagnostics and Biosurveillance.

Micromachines 2026;17:825. https://doi.org/10.3390/mi17070825.

[25] ASSIST. Guidelines for best practice for microbiology in Australian schools 2017.