Jurnal Keselamatan Kesehatan Kerja dan Lingkungan (JK3L)
e-ISSN: 2776-4133. Volume 07 (2) 2026
http://jk3l.fkm.unand.ac.id/index.php/jk3l/index

Analisis Pajanan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ serta Gangguan Pernapasan pada Pekerja Sektor Informal Industri Tahu di Kelurahan Selili

Analysis of PM_{10} and $PM_{2.5}$ Exposure on Respiratory Disorders among Informal Sector Workers in the Tofu Industry in Selili Village, 2025

Alfina Rahma Adila[1], Ayudhia Rachmawati[1*], Masithah Masithah[2], Vivi Filia Elvira[1], Syamsir Syamsir[1]

1. Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Mulawarman, Kalimantan Timur
2. Departemen Biostatistika dan Kependudukan Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Mulawarman, Kalimantan Timur

***Corresponding Author: Ayudhia Rachmawati**
Email: rachmawatiayudhia@fkm.unmul.ac.id

ABSTRAK

Industri tahu sektor informal yang menggunakan bahan bakar kayu berpotensi menghasilkan partikulat PM_{10} dan $PM_{2,5}$ dalam konsentrasi tinggi. Kondisi ini menurunkan kualitas udara pada ruang produksi semi-*indoor* sehingga meningkatkan risiko gangguan pernapasan pada pekerja. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pajanan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ terhadap gangguan pernapasan pada pekerja industri tahu di Kelurahan Selili. Metode yang digunakan adalah Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) melalui pengukuran konsentrasi *particulate matter* menggunakan alat *Dust Detector*, serta wawancara menggunakan kuesioner *St. George's Respiratory Questionnaire* (SGRQ) untuk menilai gangguan pernapasan. Selain itu, dilakukan perhitungan *intake*, Risk Quotient (RQ), dan analisis manajemen risiko. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata konsentrasi PM_{10} sebesar 1,054 mg/m³ dan $PM_{2,5}$ sebesar 0,333 mg/m³ pada 21 titik. Seluruh responden memiliki nilai RQ > 1 dengan rata-rata RQ PM_{10} sebesar 9,190 dan $PM_{2,5}$ sebesar 2,258, yang menunjukkan pajanan melebihi batas aman. Kesimpulan penelitian ini adalah pajanan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ berada pada tingkat berisiko dan berpotensi menyebabkan gangguan pernapasan. Disarankan pengendalian melalui penambahan ventilasi (*exhaust fan*), penggunaan masker N95, serta bahan bakar lebih ramah lingkungan, disertai edukasi dan pengawasan rutin untuk meningkatkan keselamatan kerja.

Kata Kunci: PM_{10}, $PM_{2,5}$, Gangguan Pernapasan, ARKL, Industri Tahu

ABSTRACT

The informal tofu industry using wood fuel has the potential to produce high concentrations of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$). This condition reduces air quality, particularly in semi-indoor production areas, thereby increasing the risk of respiratory disorders among workers. This study aims to analyze exposure to PM_{10} and $PM_{2.5}$ and its association with respiratory disorders among tofu industry workers in Selili Village. This study employed the Environmental Health Risk Assessment (EHRA) method, with data collected through particulate matter concentration measurements using a Dust Detector and questionnaire-based interviews using the St. George's Respiratory Questionnaire (SGRQ) to assess respiratory disorders. Additionally, intake, Risk Quotient (RQ), and risk management analyses were performed. The results showed that the average PM10 concentration was 1.054 mg/m³, while the average $PM_{2.5\ concentration}$ was 0.333 mg/m³ across 21 measurement points. All respondents had RQ values > 1, with average RQ values of 9.190 for PM_{10} and 2.258 for $PM_{2.5}$, indicating that exposure levels exceeded the safe threshold. In conclusion, exposure to PM_{10} and $PM_{2.5}$ is hazardous and has the potential to cause respiratory disorders among workers. It is recommended to implement control measures, such as improving ventilation (e.g., installing exhaust fans), using personal protective equipment (e.g., N95 masks), and adopting more environmentally friendly fuels. Additionally, education and regular monitoring are needed to improve occupational health and safety.

Keywords: PM_{10}, $PM_{2.5}$, Respiratory Disorders, EHRA, Tofu Industry

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat akibat aktivitas manusia, terutama pada sektor industri. *Particulate matter* (PM) menjadi salah satu polutan yang berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara dan berdampak langsung terhadap kesehatan manusia. Partikel ini terdiri dari berbagai ukuran seperti PM_{10} dan $PM_{2,5}$ yang mampu masuk ke dalam sistem pernapasan dan menimbulkan gangguan kesehatan.[1,2]

Paparan partikulat di udara dapat menyebabkan berbagai gangguan pernapasan, mulai dari iritasi saluran napas hingga penyakit paru kronis. Partikel berukuran kecil seperti $PM_{2,5}$ dapat menembus hingga alveoli sehingga meningkatkan risiko gangguan kesehatan yang lebih serius.[3,4] Dampak tersebut menjadikan pencemaran udara sebagai faktor risiko penting dalam kesehatan lingkungan.[5]

Sumber pencemaran partikulat berasal dari berbagai aktivitas, termasuk kegiatan industri dan pembakaran bahan bakar. Industri tahu sebagai sektor informal masih banyak menggunakan bahan bakar kayu dalam proses produksinya. Proses pembakaran tersebut menghasilkan polutan berupa PM_{10} dan $PM_{2,5}$ yang dapat mencemari lingkungan kerja, terutama pada ruang produksi semi-*indoor*.[6]

Kondisi tersebut meningkatkan potensi pajanan bagi pekerja yang berada di sekitar area produksi.[7] Selain itu, konsentrasi partikulat di udara juga dipengaruhi oleh faktor meteorologi seperti suhu, kelembaban, dan kecepatan angin yang berperan dalam proses dispersi polutan di udara.

Kelurahan Selili merupakan salah satu kawasan sentra industri tahu di Kota Samarinda yang memiliki karakteristik industri berskala rumah tangga dengan sistem produksi yang masih sederhana. Proses produksi dilakukan secara terus-menerus setiap hari dengan menggunakan bahan bakar kayu, serta sebagian besar ruang produksi bersifat semi-*indoor*. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan akumulasi asap dan partikulat di dalam ruang kerja sehingga meningkatkan risiko pajanan bagi pekerja yang berada di lingkungan tersebut.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa paparan *particulate matter* di lingkungan kerja berkaitan dengan peningkatan risiko gangguan pernapasan pada pekerja. Penelitian pada sektor industri dan lingkungan kerja menunjukkan adanya hubungan antara konsentrasi PM dengan keluhan kesehatan pernapasan.[8,9] Kondisi kualitas udara yang buruk di area kerja juga ditemukan pada industri tahu yang menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi partikulat.[10]

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar tradisional dalam proses produksi industri tahu dapat menurunkan kualitas udara di area kerja akibat akumulasi asap dan partikulat di ruang produksi.[11] Kondisi serupa juga ditemukan pada berbagai sektor industri lain yang sama-sama menghasilkan emisi partikulat, dimana konsentrasi PM_{10} dan $PM_{2,5}$ di lingkungan kerja berhubungan dengan peningkatan risiko gangguan kesehatan pernapasan.[9] Paparan partikulat yang terjadi secara terus-menerus di lingkungan kerja, terutama pada ruang semi-*indoor* dengan ventilasi terbatas, dapat meningkatkan peluang terjadinya pajanan inhalasi pada pekerja.

Sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada hubungan paparan dan dampak kesehatan secara umum serta belum banyak mengkaji tingkat risiko berdasarkan perhitungan risiko menggunakan pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), khususnya pada industri tahu skala kecil dengan kondisi ruang semi-indoor. Penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menerapkan pendekatan ARKL dalam menilai tingkat risiko paparan particulate matter pada pekerja industri tahu.[12,13]

Pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) digunakan untuk mengidentifikasi bahaya, menganalisis pajanan, serta mengkarakterisasi risiko kesehatan akibat paparan partikulat. Metode ini memberikan gambaran kuantitatif terkait tingkat risiko yang diterima oleh individu di lingkungan kerja.[13]

Penelitian ini bertujuan untuk menilai tingkat risiko pajanan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ serta gambaran gangguan pernapasan pada pekerja industri tahu di Kelurahan Selili. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam upaya pengendalian risiko serta peningkatan kesehatan dan keselamatan kerja pada sektor industri informal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif melalui metode Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Penelitian dilaksanakan pada industri tahu di Kelurahan Selili, Kecamatan Samarinda Ilir, Kota Samarinda. Subjek penelitian adalah seluruh pekerja industri tahu yang berjumlah 58 orang dengan teknik total sampling. Unit analisis meliputi 21 titik pengukuran pada area produksi yang mewakili kondisi pajanan partikulat di lingkungan kerja.

Pengumpulan data dilakukan menggunakan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung konsentrasi PM_{10} dan $PM_{2,5}$ menggunakan alat *Dust Detector*, serta wawancara menggunakan kuesioner *St. George's Respiratory Questionnaire* (SGRQ) untuk memperoleh data karakteristik responden dan pola pajanan seperti waktu pajanan, frekuensi, dan durasi pajanan.[14] Kuesioner SGRQ menghasilkan skor total yang mencerminkan tingkat gangguan pernapasan, dimana semakin tinggi skor artinya menunjukkan kondisi yang lebih buruk. Dalam penelitian ini, skor total SGRQ dikategorikan menjadi tiga tingkat gangguan pernapasan, yaitu ringan (0-25), sedang (26-50), dan berat (51-75). Data sekunder diperoleh dari dokumen dan literatur yang relevan.

ARKL dilakukan melalui tahapan identifikasi bahaya, analisis dosis-respon, analisis pajanan, dan karakterisasi risiko (RQ). Perhitungan intake untuk zat non-karsinogenik dilakukan melalui jalur inhalasi menggunakan rumus sebagai berikut[12]:

$$I = \frac{C \times R \times t_E \times f_E \times D_t}{W_b \times t_{avg}}$$

Keterangan:

I = Asupan (*intake*) (mg/kg.hari)
C = Konsentrasi agen risiko (mg/m^3)
R = Laju asupan atau konsumsi (m/jam)
tE = Lamanya atau jumlah jam/hari terjadinya pajanan
fE = Frekuensi pajanan (hari/tahun)
Dt = Durasi pajanan (tahun)
Wb = Berat badan (kg)
t_{avg} = Periode rata-rata harian (Dt × 365 hari/tahun)

Nilai *Risk Quotient* (RQ) dihitung untuk menentukan tingkat risiko kesehatan dengan rumus[12]:

$$RQ = \frac{I}{RfC}$$

Keterangan:

RQ = Karakteristik risiko (*risk quotient*)
I = *Intake*/asupan
RfC = *Dosis cencentration* atau dosis referensi (untuk paparan inhalasi)

Nilai RQ > 1 menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan akibat pajanan partikulat.[12] Analisis data dilakukan secara deskriptif dengan menyajikan nilai rata-rata dan distribusi untuk menggambarkan konsentrasi PM_{10} dan $PM_{2,5}$, nilai intake, serta nilai RQ pada pekerja. Hasil analisis digunakan sebagai dasar dalam menentukan upaya pengendalian risiko di lingkungan kerja.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu identifikasi bahaya, analisis dosis-respon, analisis pajanan, dan karakterisasi risiko.[12]

1. Karakteristik Responden

Karakteristik responden dalam penelitian ini merupakan pekerja industri tahu yang berada di Kampung Tahu, Kelurahan Selili, RT 10, 11, 12, 13, dan 14. Jumlah responden sebanyak 58 orang yang berasal dari 21 unit industri tahu. Karakteristik yang diamati meliputi jenis kelamin, umur, tingkat pendidikan, dan unit kerja. Data diperoleh melalui wawancara langsung dan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 1. Gambaran Umum Karakteristik Pekerja Industri Tahu

Variabel	Frekuensi (n=58)	Persentase (%)
Jenis Kelamin		
Laki-laki	50	86,2
Perempuan	8	13,8
Umur (Tahun)		
12-18	2	3,4
18-40	35	60,3
40-60	18	31,0
> 60	3	5,2

:

Variabel	Frekuensi (n=58)	Persentase (%)
Pendidikan Terakhir		
SD	11	19,0
SMP	16	27,6
SMA/SMK	28	48,3
Perguruan Tinggi	6	5,2
Unit Kerja		
Pemotongan	11	19,0
Pencucian	2	3,4
Pengemasan	6	10,3
Penggorengan	22	37,9
Penyaringan	11	19,0
Perebusan	6	10,3
Total	**58**	**100**

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan tabel 1, sebagian besar responden berjenis kelamin laki-laki sebanyak 50 orang, sedangkan perempuan sebanyak 8 orang. Mayoritas responden berada pada kelompok usia 18-40 tahun sebanyak 35 orang dan usia 40-60 tahun sebanyak 18 orang. Tingkat pendidikan didominasi oleh lulusan SMA/SMK sebanyak 28 orang, kemudian SMP sebanyak 16 orang, dan SD sebanyak 11 orang, sedangkan perguruan tinggi sebanyak 6 orang. Berdasarkan unit kerja, bagian penggorengan memiliki jumlah pekerja terbanyak yaitu 22 orang, bagian pemotongan dan penyaringan masing-masing 11 orang. Karakteristik responden berperan dalam menentukan besarnya pajanan karena digunakan dalam perhitungan intake pada metode ARKL.[13,15] Usia mempengaruhi kerentanan terhadap paparan, dimana peningkatan usia berkaitan dengan penurunan fungsi paru.[16,17]

Dominasi pekerja laki-laki menunjukkan tingginya aktivitas fisik yang dapat meningkatkan jumlah udara yang dihirup selama bekerja.[18] Tingkat pendidikan yang sebagian besar menengah menunjukkan perlunya peningkatan pemahaman terkait penggunaan alat pelindung diri.[19]

Unit kerja penggorengan berpotensi memiliki pajanan lebih tinggi karena berkaitan langsung dengan proses pembakaran yang menghasilkan partikulat di ruang semi-*indoor*.[7] Lama dan frekuensi kerja yang tinggi turut meningkatkan nilai *intake* serta risiko kesehatan pekerja.[17]

Karakteristik individu dan pola kerja responden juga dianalisis secara deskriptif untuk memberikan gambaran kondisi antropometri serta pola aktivitas kerja pekerja industri tahu yang disajikan pada tabel berikut:

Tabel 2. Karakteristik Antropometri dan Pola Aktivitas Pekerja Industri Tahu

Variabel	Min	Max	Mean
Berat Badan (Kg)	40,000	97,000	61,830
Lama Kerja (Tahun)	1,000	45,000	10,450
Hari Libur (Hari/1 Bulan)	1,000	4,000	1,980
Durasi Kerja (Jam/Hari)	6,000	15,000	9,640

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan tabel 2, rata-rata berat badan responden sebesar 61,830 kg dengan rentang 40-97 kg. Rata-rata lama kerja responden mencapai 10,450 tahun dengan rentang 1-45 tahun, menunjukkan bahwa sebagian pekerja telah terpapar dalam jangka waktu yang cukup lama. Rata-rata hari libur responden sebesar 1,980 hari per bulan, sedangkan durasi kerja harian mencapai 9,640 jam dengan rentang 6-15 jam per hari.

Karakteristik antropometri dan pola aktivitas kerja tersebut merupakan komponen penting dalam analisis pajanan karena digunakan dalam perhitungan intake melalui jalur inhalasi. Parameter seperti berat badan (Wb), durasi pajanan harian (tE), frekuensi pajanan (fE), serta lama pajanan (Dt) secara langsung memengaruhi besarnya dosis yang diterima individu.[13]

Berat badan dalam penelitian ini berada di sekitar nilai rata-rata dewasa, namun variasi antar responden tetap memengaruhi nilai *intake*. Dalam analisis ARKL, berat badan berperan sebagai faktor pembagi sehingga individu dengan berat badan lebih rendah cenderung menerima nilai *intake* yang lebih besar dibandingkan individu dengan berat badan lebih tinggi.[15]

Durasi kerja harian yang mencapai rata-rata 9,640 jam/hari menunjukkan bahwa sebagian besar responden telah melebihi waktu kerja standar yang umumnya digunakan dalam analisis pajanan yaitu 8 jam/hari. Kondisi ini

meningkatkan peluang terjadinya pajanan karena semakin lama pekerja berada di lingkungan kerja, semakin besar jumlah partikulat yang terhirup. Selain itu, lama kerja yang mencapai rata-rata lebih dari 10 tahun menunjukkan adanya pajanan dalam jangka panjang. Paparan yang berlangsung terus-menerus selama bertahun-tahun dapat meningkatkan akumulasi zat dalam tubuh dan berkontribusi terhadap peningkatan risiko gangguan kesehatan.[20]

2. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Particulate matter (PM) merupakan polutan udara yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar, termasuk penggunaan kayu pada industri tahu. Partikulat seperti PM_{10} dan $PM_{2,5}$ dapat masuk ke dalam sistem pernapasan dan menimbulkan gangguan kesehatan pada pekerja.[21]

Paparan PM_{10} dapat menyebabkan gangguan pada saluran pernapasan bagian atas, sedangkan $PM_{2,5}$ memiliki ukuran lebih kecil sehingga dapat mencapai alveoli dan meningkatkan risiko gangguan paru-paru. Pajanan dalam konsentrasi tinggi secara terus-menerus berpotensi menimbulkan penyakit pernapasan kronis.[9]

Pengukuran parameter kualitas udara dilakukan untuk mengetahui kondisi lingkungan kerja, meliputi PM_{10}, $PM_{2,5}$, dan faktor meteorologi seperti suhu, kelembaban, serta kecepatan angin. Hasil pengukuran dibandingkan dengan baku mutu yang berlaku dan disajikan pada tabel berikut:

Tabel 3. Hasil Pengukuran PM_{10}, $PM_{2,5}$, dan faktor meteorologi di Industri Tahu

Variabel	Mean	Baku Mutu	
		Nilai	Peraturan
PM_{10} (mg/m^3)	1,054	10 mg/m^3	Permenkes No. 70 Tahun 2016
$PM_{2,5}$ (mg/m^3)	0,333	3 mg/m^3	
Kelembaban (%)	72,633	40-60%	Permenkes No. 48 Tahun 2016
Suhu (°C)	33,424	23-26°C	
Kecepatan Angin (m/s)	0,329	0,15-0,5 m/s	

Sumber: Data Primer, 2026

Rata-rata konsentrasi PM_{10} sebesar 1,054 mg/m^3 dan $PM_{2,5}$ sebesar 0,333 mg/m^3. Nilai tersebut masih berada di bawah baku mutu yang ditetapkan dalam Permenkes No. 70 Tahun 2016, namun tetap berpotensi menimbulkan risiko kesehatan akibat pajanan jangka panjang.

Nilai kelembaban rata-rata sebesar 72,633% menunjukkan kondisi yang melebihi kisaran baku mutu 40-60%. Suhu rata-rata sebesar 33,424°C juga berada di atas standar kenyamanan kerja yaitu 23-26°C, sedangkan kecepatan angin sebesar 0,329 m/s masih berada dalam kisaran yang diperbolehkan dalam Permenkes No. 48 Tahun 2016.

Kondisi meteorologi tersebut menunjukkan bahwa ventilasi dan sirkulasi udara di area produksi belum optimal. Suhu dan kelembaban yang tinggi serta kecepatan angin yang relatif rendah dapat menyebabkan akumulasi partikulat di udara sehingga meningkatkan potensi pajanan bagi pekerja.[22]

3. Analisis Dosis-Respon (*Dose-Response Assessment*)

Analisis dosis-respon dalam penelitian ini menggunakan parameter *Reference Concentration* (RfC) untuk menilai risiko non-karsinogenik akibat pajanan partikulat melalui jalur inhalasi. RfC merupakan konsentrasi harian agen yang dianggap aman dan tidak menimbulkan gangguan kesehatan meskipun pajanan terjadi dalam jangka waktu lama.[23,5] Nilai RfC yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu dan digunakan sebagai pembanding dalam perhitungan *Risk Quotient* (RQ) untuk menentukan tingkat risiko kesehatan akibat pajanan partikulat.

Nilai RfC untuk PM10 dalam penelitian ini sebesar 0,014 mg/kg/hari.[24] Sedangkan nilai RfC untuk PM2,5 sebesar 0,018 mg/kg/hari.[5] Nilai tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan tingkat

:

risiko kesehatan pada pekerja industri tahu. Penggunaan nilai dari penelitian sebelumnya dilakukan karena nilai RfC untuk PM_{10} dan $PM_{2,5}$ belum tersedia secara lengkap dalam basis data resmi seperti IRIS maupun MRLs. Perbedaan pendekatan dalam penentuan nilai RfC dapat mempengaruhi hasil estimasi risiko. Variasi nilai yang digunakan dalam penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode penentuan RfC dapat berdampak pada besarnya nilai *Risk Quotient* (RQ) yang diperoleh.[23]

4. Analisis Pajanan (*Exposure Assessment*)

Analisis pajanan dilakukan untuk menentukan besarnya asupan (*intake*) partikulat yang masuk ke dalam tubuh pekerja melalui jalur inhalasi. Perhitungan intake didasarkan pada konsentrasi partikulat, laju inhalasi, waktu pajanan, frekuensi pajanan, durasi pajanan, dan berat badan pekerja.[12]

Nilai parameter yang digunakan dalam perhitungan meliputi konsentrasi partikulat yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung di lokasi penelitian, sedangkan parameter lain seperti laju inhalasi, frekuensi pajanan, dan durasi pajanan ditentukan berdasarkan data hasil wawancara responden serta mengacu pada nilai standar atau referensi yang relevan dalam analisis risiko kesehatan lingkungan.

Perhitungan intake menggunakan rumus non-karsinogenik dengan hasi perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai *Intake* PM_{10} dan $PM_{2,5}$ pada Pekerja Industri Tahu

Intake	Hasil Perhitungan		
	Min	Max	Mean
PM_{10} (mg/kg/hari)	0,075	0,250	0,129
$PM_{2,5}$ (mg/kg/hari)	0,024	0,079	0,041

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan Tabel 4, nilai *intake* PM_{10} memiliki rata-rata sebesar 0,129 mg/m³ dengan rentang nilai antara 0,075-0,250 mg/m³. Nilai *intake* $PM_{2,5}$ menunjukkan rata-rata sebesar 0,041 mg/m³ dengan rentang antara 0,024-0,079 mg/m³. Variasi nilai tersebut menunjukkan adanya perbedaan tingkat pajanan antar pekerja yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan kerja dan aktivitas produksi.

Nilai *intake* menggambarkan jumlah partikulat yang masuk ke dalam tubuh pekerja setiap hari berdasarkan berat badan. Nilai *intake* yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung *Risk Quotient* (RQ) sebagai indikator tingkat risiko kesehatan. Pajanan partikulat yang terjadi secara terus-menerus berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan apabila nilai RQ melebihi batas aman.[12]

Kondisi lingkungan kerja yang bersifat semi-*indoor* serta penggunaan bahan bakar kayu dalam proses produksi turut berkontribusi terhadap peningkatan konsentrasi partikulat di udara. Hal tersebut menyebabkan meningkatnya jumlah partikulat yang terhirup oleh pekerja selama melakukan aktivitas produksi.

5. Karakterisasi Risiko (*Risk Characterization*)

Karakterisasi risiko dilakukan untuk menentukan tingkat risiko kesehatan akibat pajanan partikulat dengan membandingkan nilai *intake* terhadap *Reference Concentration* (RfC). Nilai risiko dinyatakan dalam Risk Quotient (RQ), dimana RQ $\leq$ 1 menunjukkan bahwa pajanan masih dalam batas aman, sedangkan RQ > 1 menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan yang perlu dikendalikan.[12]

Hasil karakterisasi risiko pajanan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ disajikan pada tabel berikut:

Tabel 5. Nilai RQ PM_{10} dan $PM_{2,5}$

Parameter	Karakterisasi Risiko (RQ)				Mean
	RQ ≤ 1		RQ > 1		
	n	%	n	%	
PM_{10} (mg/m³)	0	0	58	100	9,190
$PM_{2,5}$ (mg/m³)	0	0	58	100	2,258

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan hasil karakterisasi risiko, seluruh responden memiliki nilai yaitu RQ > 1 baik untuk PM_{10} maupun $PM_{2,5}$. Nilai rata-rata RQ PM_{10} sebesar 9,190 dan $PM_{2,5}$ sebesar 2,258 menunjukkan bahwa tingkat pajanan partikulat pada pekerja telah melebihi batas aman yang direkomendasikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa bahkan dalam kondisi pajanan yang umum terjadi, risiko

kesehatan sudah berada pada kategori tidak aman. Nilai RQ yang melebihi 1 menunjukkan bahwa pekerja berada pada kondisi berisiko terhadap gangguan kesehatan akibat pajanan partikulat. Tingginya nilai RQ dipengaruhi oleh besarnya konsentrasi partikulat di lingkungan kerja serta karakteristik pajanan yang terjadi selama aktivitas produksi.[7]

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pajanan partikulat di lingkungan kerja berkaitan dengan peningkatan nilai RQ di atas batas aman. Penelitian Pertiwi et al., (2024) menunjukkan bahwa rata-rata nilai RQ PM_{10} dan $PM_{2,5}$ berada pada kategori berisiko akibat tingginya konsentrasi partikulat di lokasi penelitian. Penelitian Tenriawi & Leonard (2025) juga menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi partikulat berbanding lurus dengan peningkatan nilai RQ yang dihasilkan.

Nilai RQ yang tinggi menunjukkan bahwa paparan partikulat berpotensi menimbulkan dampak kesehatan pada pekerja. Partikulat berukuran kecil dapat masuk ke dalam sistem pernapasan dan menyebabkan gangguan fungsi paru, iritasi saluran napas, serta meningkatkan risiko penyakit kronis apabila pajanan berlangsung dalam jangka waktu lama.[2,26]

Berdasarkan hasil analisis yang menunjukkan bahwa seluruh nilai RQ > 1, maka pajanan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ pada pekerja industri tahu berada pada kategori berisiko dan memerlukan upaya pengendalian. Kondisi ini menunjukkan bahwa tingkat pajanan telah melebihi batas aman, sehingga perlu dilakukan tahapan lanjutan berupa manajemen risiko dan komunikasi risiko untuk menurunkan potensi dampak kesehatan yang ditimbulkan.[23]

6. Manajemen Risiko

Manajemen risiko dilakukan untuk menentukan batas pajanan yang masih dapat diterima agar nilai RQ berada pada kondisi aman. Pendekatan yang digunakan meliputi penentuan konsentrasi aman (C_{aman}), waktu pajanan aman (tE_{aman}), dan frekuensi pajanan aman (fE_{aman}) sebagai upaya pengendalian risiko.[12]

Tabel 6. Hasil Perhitungan Manajemen Risiko PM_{10} dan $PM_{2,5}$

Parameter	C_{aman}	tE_{aman}	fE_{aman}
PM_{10}	0,117	1,074	37,471
$PM_{2,5}$	0,151	4,371	152,489

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan Tabel 6, nilai konsentrasi aman (C_{aman}) menunjukkan batas maksimum partikulat yang masih dapat diterima tanpa menimbulkan risiko kesehatan. PM_{10} memiliki nilai sebesar 0,117 mg/m³ dan untuk batas konsentrasi aman $PM_{2,5}$ memiliki nilai sebesar 0,151 mg/m³.

Nilai waktu pajanan aman (tE_{aman}) menunjukkan batas durasi pajanan yang masih dapat diterima oleh pekerja. Hasil perhitungan waktu pajanan aman menunjukkan bahwa batas waktu pajanan aman untuk PM_{10} sebesar 1,074 (jam/hari) dan untuk $PM_{2,5}$ sebesar 4,371 (jam/hari).

Nilai frekuensi pajanan aman (fE_{aman}) menunjukkan batas jumlah hari pajanan yang masih dapat diterima dalam satu tahun. Hasil menunjukkan bahwa batas frekuensi pajanan aman untuk PM_{10} sebesar 37,471 (hari/tahun) dan untuk $PM_{2,5}$ sebesar 152,489 (hari/tahun).

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengendalian risiko tidak dapat dilakukan hanya dengan satu pendekatan. Kondisi lingkungan kerja yang menggunakan bahan bakar kayu dan berlangsung secara terus-menerus menyebabkan paparan partikulat sulit dikendalikan hanya melalui pengaturan waktu atau frekuensi pajanan.

Upaya pengendalian lebih efektif dilakukan melalui pengendalian sumber dan lingkungan kerja, seperti penggunaan APD berupa masker N95, penambahan ventilasi seperti *exhaust fan*, serta penataan bahan bakar agar tidak menghambat sirkulasi udara.[27,28] Selain itu, penggunaan bahan bakar yang lebih ramah lingkungan dapat menjadi alternatif untuk menurunkan konsentrasi partikulat. Pemanfaatan limbah tahu sebagai biogas maupun penggunaan bahan bakar yang lebih baik dalam

:

mengurangi paparan polutan di lingkungan kerja.[29]

7. Komunikasi Risiko

Komunikasi risiko dilakukan sebagai upaya untuk menyampaikan informasi terkait tingkat risiko serta langkah pengendalian yang dapat dilakukan kepada pihak yang terdampak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh responden memiliki nilai RQ > 1, sehingga diperlukan penyampaian informasi yang jelas untuk meningkatkan kesadaran pekerja terhadap risiko yang dihadapi.[12]

Komunikasi risiko merupakan proses pertukaran informasi antara pihak yang memiliki data dengan individu yang terdampak agar dapat mengambil keputusan yang tepat dalam melindungi kesehatan.[30,31] Pelaksanaan komunikasi risiko dilakukan melalui penyampaian langsung kepada perwakilan pekerja di lokasi produksi. Informasi yang disampaikan meliputi hasil pengukuran konsentrasi partikulat, nilai intake, serta nilai RQ yang menunjukkan kondisi berisiko. Penyampaian dilakukan secara sederhana dan disesuaikan dengan kondisi lingkungan kerja agar mudah dipahami oleh pekerja.

Strategi komunikasi dilakukan melalui edukasi langsung, diskusi, serta penyuluhan terkait penggunaan alat pelindung diri, pengaturan lingkungan kerja, dan pentingnya menjaga kesehatan selama bekerja. Pendekatan ini dinilai efektif dalam meningkatkan pemahaman serta mendorong perubahan perilaku pekerja terhadap risiko kesehatan.[32,33]

Upaya komunikasi risiko juga dapat diperkuat melalui dukungan pemilik usaha dan pemangku kepentingan terkait untuk mendorong perbaikan kondisi lingkungan kerja secara berkelanjutan. Dengan adanya komunikasi yang baik, diharapkan pekerja dapat lebih sadar terhadap risiko yang ada serta mampu menerapkan langkah pencegahan secara mandiri.

8. Gambaran Gejala Gangguan Pernapasan

Penilaian gejala gangguan pernapasan pada pekerja industri tahu dilakukan menggunakan sistem skoring yang kemudian dikategorikan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keparahan gejala pernapasan yang dialami responden selama bekerja di lingkungan produksi. Hasil skoring disajikan pada tabel berikut:

Tabel 7. Distribusi Tingkat Keparahan Gejala Gangguan Pernapasan Pekerja

Skor	Frekuensi (n=58)	Persentase (%)
0-25 (Gangguan Ringan)	45	77,6
26-50 (Gangguan Sedang)	11	19,0
51-75 (Gangguan Berat)	2	3,4
Total	**58**	**100**

Sumber: Data Primer, 2026

Berdasarkan tabel 7, sebagian besar pekerja berada pada kategori gangguan ringan yaitu sebanyak 45 orang (77,6%). Kategori gangguan sedang sebanyak 11 orang (19,0%), sedangkan gangguan berat hanya ditemukan pada 2 orang (3,4%). Hasil ini menunjukkan bahwa mayoritas responden telah mengalami gejala gangguan pernapasan, meskipun sebagian besar masih dalam tingkat ringan.

Sebagian besar pekerja mengalami gangguan pernapasan dalam kategori ringan, namun terdapat pula pekerja dengan kategori sedang dan berat. Kondisi ini menunjukkan bahwa paparan partikulat di lingkungan kerja telah memberikan dampak terhadap sistem pernapasan pekerja, meskipun dengan tingkat keparahan yang berbeda. Gejala ringan umumnya berupa batuk atau iritasi tenggorokan, sedangkan pada kategori yang lebih tinggi dapat berkembang menjadi sesak napas atau gangguan fungsi paru.[34]

Paparan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ yang terjadi secara terus-menerus selama proses produksi berpotensi menyebabkan iritasi saluran pernapasan dan gangguan kesehatan yang lebih serius. Hasil ini sejalan dengan penelitian Sari (2017) yang menunjukkan bahwa peningkatan paparan debu berkaitan dengan meningkatnya keluhan pernapasan pada pekerja. Selain itu, penelitian Agustan et al., (2024) juga menyebutkan bahwa paparan partikulat berhubungan dengan kejadian ISPA dan gangguan respirasi

lainnya.

Selain faktor lingkungan kerja, gangguan pernapasan juga dipengaruhi oleh faktor individu seperti kebiasaan merokok dan kondisi imunitas. Kebiasaan merokok diketahui dapat memperburuk kondisi saluran pernapasan akibat paparan zat iritan yang merusak mekanisme pertahanan paru. Akan tetapi faktor-faktor tersebut tidak dianalisis secara khusus dalam penelitian ini sehingga pengaruhnya terhadap tingkat gangguan pernapasan belum dapat dijelaskan secara mendalam. Oleh karena itu, interpretasi hasil penelitian perlu dilakukan secara hati-hati karena gejala gangguan pernapasan yang dialami pekerja kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi antara pajanan partikulat dan faktor individu lainnya. Pernyataan ini didukung oleh penelitian Anissah et al., (2025) dan Yulistiani & Pratama (2026) yang menyebutkan bahwa faktor individu turut memengaruhi gangguan pernapasan pada pekerja yang terpapar partikulat.

KESIMPULAN

Paparan PM_{10} dan $PM_{2,5}$ pada pekerja industri tahu di Kelurahan Selili menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan yang cukup bahaya. Hasil analisis ARKL menunjukkan bahwa nilai *Risk Quotient* (RQ) pada seluruh responden berada pada kategori berisiko (RQ > 1). Kondisi ini menunjukkan bahwa pajanan partikulat di lingkungan kerja telah melampaui batas aman dan berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, khususnya pada sistem pernapasan pekerja.

Tingginya nilai *intake* yang dipengaruhi oleh konsentrasi partikulat di lingkungan kerja serta pola pajanan harian yang cukup lama menunjukkan bahwa akumulasi paparan terjadi secara terus-menerus selama proses produksi. Hal ini diperkuat dengan hasil gambaran gejala gangguan pernapasan yang menunjukkan bahwa sebagian besar pekerja mengalami keluhan pernapasan dalam kategori ringan hingga sedang, bahkan terdapat responden dengan kategori berat.

Berdasarkan hasil manajemen risiko, diperlukan upaya pengendalian untuk menurunkan tingkat paparan melalui pengaturan konsentrasi, waktu, dan frekuensi pajanan. Namun, kondisi di lapangan menunjukkan bahwa pengendalian berbasis waktu dan frekuensi sulit diterapkan secara penuh karena karakteristik pekerjaan yang bersifat rutin dan berlangsung setiap hari. Oleh karena itu, pengendalian lebih diarahkan pada upaya seperti penggunaan APD berupa masker N95, penambahan ventilasi seperti *exhaust fan*, serta penataan bahan bakar agar tidak menghambat sirkulasi udara.

Selain itu, komunikasi risiko dapat dilakukan dengan penyampaian informasi kepada pekerja dan pengelola industri terkait kondisi paparan dan potensi dampaknya. Peningkatan kesadaran pekerja melalui penggunaan APD serta edukasi mengenai bahaya partikulat menjadi bagian penting dalam upaya pencegahan. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengendalian risiko kesehatan kerja secara berkelanjutan di industri tahu.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelurahan selili dan Koperasi Lestari Makmur yang telah memberikan dukungan dan akses data sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Apresiasi juga disampaikan kepada dosen-dosen dan seluruh pihak yang telah membantu serta berkontribusi dalam proses penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung, mulai dari tahap persiapan hingga penyusunan akhir.

DAFTAR PUSTAKA

1. Manisalidis L, Stavropoulou E, Stavropoulos A, Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: A review. Frontiers in Public Health. 2020;8. Available from: https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014
2. Mukono HJ. Pencemaran Udara dan Pengaruhnya terhadap Gangguan Saluran Pernapasan. In Surabaya: Airlangga University Press; 2008.
3. Maksum TS, Flora S, Tarigan N. Analisis Risiko Kesehatan Akibat Paparan Partikel Debu (PM2.5) dari Aktivitas Transportasi. Jambura Heal Sport J. 2022;4(1):19–28.

:

4. Morawska L, Ayoko GA, Bae GN, Buonanno G, Chao CYH, Clifford S, et al. Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. Environ Int [Internet]. 2017;108:75–83. Available from: https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.07.025
5. Cahyanti C, Azteria V, Nitami M, Ayu IM. Pajanan PM2.5 dan Risiko Kesehatan pada Pedagang Kaki Lima di Terminal Kalideres. Heal Publica. 2025;6(2):94–105.
6. Djayanti S. Kajian Penerapan Produksi Bersih Diindustri Tahu di Desa Jimbaran, Bandungan, Jawa Tengah. J Ris Teknol Pencegah Pencemaran Ind. 2015;6(2):75–80.
7. Chaeruddin ADRD, Abbas HH, Gafur A. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pajanan Debu Kayu Pada Pekerja Mebel Informal Antang. Wind Public Heal J. 2021;1(6):743–56.
8. Muliyadi, Sarjan M. Pengaruh Konsentrasi PM_{10} dengan Beberapa Keluhan Kesehatan di PT Intimkara Ternate. Media Publ Promosi Kesehat Indones. 2020;3(1).
9. Zaenab, Rafidah, Amien FF. Paparan Particulate Matter (PM10 dan PM2.5) pada Lingkungan Kerja di Pabrik Smelter PT Vale Sorowako, Luwu Timur. J Sulolipu Media Komun Sivitas Akad dan Masy. 2025;25(2):301–8.
10. Yulistiani L, Pratama A. Risiko Kesehatan Lingkungan dan Gangguan Pernapasan pada Masyarakat yang Tinggal di Sekitar Kawasan Industri di Kota Makassar, Indonesia. J Appl Heal Sci [Internet]. 2026; Available from: https://ejournal.kalibra.or.id/index.php/jahs/article/download/201/228
11. Yulianti R, Nuryana SD, Hartami PN, Budhya EF, Sari ST. Kondisi Udara Pada Area Kerja Pabrik Tahu Harapan Maju, Depok, Jawa Barat. J Wahana Abdimas Sejah. 2023;4(1):21–32.
12. Besmanto N, Cucu Cakrawati, Ahmad Rizal, Sofwan, Nugroho H, Akib CR, et al. Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Jakarta: Direktorat Jenderal PP dan PL Kementrian Kesehatan; 2012.
13. Dofendra T. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Paparan Gas Karbon Monoksida (CO) Pada Pekerja Sol Sepatu di Simpang Tugu Juang Sipin Kota Jambi Tahun 2022. Universitas Jambi; 2023.
14. Latifah HI, Gusti A, Rahmah SP. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Pajanan PM2,5 Pada Siswa di SDN 28 Mandau Duri Riau Tahun 2020. JK3L. 2021;02(01):1–10.
15. Fadhilah Hudy J. Hubungan Konsentrasi Particulate Matter (PM10) Dengan Keluhan Pernapasan Pada Pekerja di PT. Industri Kapal Indonesia (Persero) Kota Makassar. Universitas Hasanuddin Makassar; 2023.
16. Agustan J, Hariani PL, Novrikasari. Hubungan PM2,5 dan PM10 dalam Udara Ambien terhadap Penyakit Infeksi Saluran Pernapasan Akut (Studi Kasus Desa Tanjung Jambu, Kecamatan Merapi Timur, Kabupaten Lahat). J Pengendali Pencemaran Lingkung. 2024;6(2):1–8.
17. Fikri E, Dewi DR, Juariah L. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Pajanan PM2.5 dan PM10 Pada Pekerja PT. Beton Elemenindo Perkasa Tahun 2024. J Kesehat Lingkung Indones. 2025;24(1):116–23.
18. Pamungkas RE, Sulistiyani, Rahardjo M. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Akibat Paparan Karbon Monoksida (CO) melalui Inhalasi pada Pedagang di Sepanjang Jalan Depan Pasar Projo Ambarawa, Kabupaten Semarang. J Kesehat Masy [Internet]. 2017;5(5):824–31. Available from: http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkm%0AANALISIS
19. Ramadhan A. Proses Pembuatan Tahu di Pabrik Tahu Desa Dadimulyo serta Dampak Pandemi Covid-19 terhadap Produksi Tahu. J Pengabdi Kpd Masy Indones. 2023;4(2):135–45.
20. Sentosa EA, Riviwanto M, Seno BA. Analisis Risiko Gangguan Fungsi Paru Akibat Paparan Debu PM_{10} pada Pekerja Mebel Kayu. 2022;2(1):30–7. Available from: https://doi.org/10.36086/jsl.v2i1.1239
21. Budiyono, Syaichurrozi. A Review of Biogas Production from Tofu Liquid Waste. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2020;

22. Tenriawi W, Leonard F. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan terhadap Paparan Debu pada Pekerja Pasir Batu di Desa Lonjoboko Kabupaten Gowa. J Penelit Multidisiplin Ilmu. 2025;3(6):3003–8.
23. Afriyanto TP, Budiyono B, Nurjazuli N. Environmental Health Risk Analysis of PM2,5 and PM10 Exposure In Aluminium and Iron Factory Workers at PT X. E3S Web Conf [Internet]. 2025;1–20. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2025/50/e3sconf_icenis2025_02030/e3sconf_icenis2025_02030.html%0A
24. Gusti A, Arlesia A, Anshari LH. Penurunan Derajat Kesehatan Pedagang Akibat Pajanan Debu PM10. J MKMI [Internet]. 2018;14(3):233–40. Available from: http://dx.doi.org/10.30597/mkmi.v14i3.4260
25. Pertiwi KD, Lestari IP, Afandi A. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pajanan Debu PM10 dan PM2.5 pada Relawan Lalu Lintas di Jalan Diponegoro Ungaran. Pro Heal J Ilm Kesehat. 2024;6(2):85–91.
26. Vincent D. Encyclopedia of the Environment. 2025. Airborne particulate matter and their health effects. Available from: https://www.encyclopedie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects-2/
27. Hamidah OQ, Inayah Z. Hubungan Promosi K3 dengan Kejadian Unsafe Action (PT. Petrokopindo Cipta Selaras). Gorontalo J Heal Sci [Internet]. 2025; Available from: https://ejurnal.ung.ac.id/index.php/gojhes/article/view/30047
28. Lourrinx E, Hasrianto N, Nurullita U, Herbanu A, Koedoes YA, Nuswantoro W, et al. Dasar Kesehatan Lingkungan. Delianti PI, editor. Literaksi Pres; 2025.
29. Lubis DM, Sintawardani N, Hamidah U, Astuti DI, Dwiartama A, Widyarani. Sustainability Assessment of Small-Scale Tofu Industry Based on Water Resources: A Case Study of Giriharja Hamlet, Indonesia. Sanit Value Chain [Internet]. 2021;5(2):55–70. Available from: https://doi.org/10.34416/svc.00067
30. CDC. Centers for Disease Control and Prevention. 2014. Crisis and Emergency Risk Communication (CERC) Manual. Available from: https://emergency.cdc.gov/cerc/manual/index.asp
31. WHO. World Health Organization. 2018. Communicating Risk in Public Health Emergencies. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789241550208
32. Lestyoningsih IH, Ula WSD. Partisipasi Masyarakat Dalam Pengabdian Masyarakat Untuk Menerapkan Perilaku Hidup Bersih Dan Sehat (PHBS) Sebagai Upaya Peningkatan Kesehatan Lingkungan. J Tekso [Internet]. 2024; Available from: https://journal.lp3ktk.com/index.php/Tekso/article/view/28
33. Rosita Y, Sapta WA. Implementasi Promosi Kesehatan dan Keselamatan Kerja. J Kesehat Masy [Internet]. 2026; Available from: https://mail.jurnal.itk-avicenna.ac.id/index.php/jkma/article/view/288
34. Ferdian R, Sirait NE, Situmorang CM, Sari RDP, Utama WT, Daulay SA. Hubungan Paparan Debu Kayu dengan Permasalahan Sistem Respirasi pada Pekerja Industri Mebel: Sebuah Tinjauan. Media Ilm Kesehat Indones. 2024;2(3):84–94.
35. Sari EYP. Hubungan Paparan Debu dengan Keluhan Kesehatan pada Pekerja di PT Gudang Semen Setia Abadi, Kota Bengkulu. Politeknik Kesehatan Kementerian Kesehatan Bengkulu Kementerian Kesehatan Republik Indonesia; 2017.
36. Anissah N, Setiani O, Darundiati YH. Literature Review: Faktor Risiko yang Berhubungan dengan Gangguan Fungsi Paru Pekerja Industri Mebel di Indonesia. J Ilmu Kesehat Masy [Internet]. 2025; Available from: https://journals.uima.ac.id/index.php/jikm/article/download/3918/1606

: