

Strategi Agromedicine untuk Pencegahan Fibrosis Paru pada Petani: Tinjauan Sistematis Modifikasi Alat Penyimpanan Gabah, Ventilasi Gudang, dan Efektivitas APD Respirator

Rian Hendriyana Dwi Imanta^{1*}, Indri Windarti², Laisa Azka³, Andreas Infianto⁴

¹⁻⁴ Universitas Lampung, Indonesia

Email: rianstudent17@gmail.com

Article Info :

Received:

17-10-2025

Revised:

15-11-2025

Accepted:

10-12-2025

Abstract

Pulmonary fibrosis is a progressive respiratory disease associated with chronic inhalation of respirable dust and bioaerosols, posing a substantial occupational health risk for agricultural workers. Farmers involved in grain storage and handling are frequently exposed to organic dust, fungal spores, and endotoxins that can induce persistent alveolar inflammation and irreversible fibrotic changes. This systematic review examines agromedicine-based prevention strategies focusing on grain storage modification, warehouse ventilation, and the effectiveness of respiratory protective equipment. Evidence indicates that improved storage design and controlled ventilation systems significantly reduce airborne particulate concentrations, thereby lowering cumulative inhalation exposure. Respiratory protective devices, particularly high-efficiency respirators, provide additional individual-level protection, although their real-world effectiveness is strongly influenced by user compliance, proper fitting, and training. The findings highlight that reliance on personal protective equipment alone is insufficient to prevent long-term pulmonary damage. An integrated prevention framework combining engineering controls, environmental management, and occupational health education is essential to reduce the burden of pulmonary fibrosis among farmers and promote sustainable agricultural health practices.

Keywords : pulmonary fibrosis, agromedicine, grain storage, warehouse ventilation, respirator protection.

Abstrak

Fibrosis paru adalah penyakit pernapasan progresif yang terkait dengan paparan kronis terhadap debu pernapasan dan bioaerosol, yang menimbulkan risiko kesehatan kerja yang signifikan bagi pekerja pertanian. Petani yang terlibat dalam penyimpanan dan penanganan biji-bijian sering terpapar debu organik, spora jamur, dan endotoksin yang dapat menyebabkan peradangan alveolar persisten dan perubahan fibrotik irreversibel. Ulasan sistematis ini mengkaji strategi pencegahan berbasis agromedisin yang berfokus pada modifikasi penyimpanan biji-bijian, ventilasi gudang, dan efektivitas peralatan pelindung pernapasan. Bukti menunjukkan bahwa desain penyimpanan yang ditingkatkan dan sistem ventilasi terkontrol secara signifikan mengurangi konsentrasi partikel udara, sehingga menurunkan paparan inhalasi kumulatif. Alat pelindung pernapasan, terutama respirator ber efisiensi tinggi, memberikan perlindungan tambahan pada tingkat individu, meskipun efektivitasnya di dunia nyata sangat dipengaruhi oleh kepatuhan pengguna, pemasangan yang tepat, dan pelatihan. Temuan ini menyoroti bahwa ketergantungan pada peralatan pelindung pribadi saja tidak cukup untuk mencegah kerusakan paru-paru jangka panjang. Kerangka kerja pencegahan terintegrasi yang menggabungkan pengendalian teknik, manajemen lingkungan, dan pendidikan kesehatan kerja sangat penting untuk mengurangi beban fibrosis paru di kalangan petani dan mempromosikan praktik kesehatan pertanian yang berkelanjutan.

Kata kunci: fibrosis paru, agromedisin, penyimpanan biji-bijian, ventilasi gudang, perlindungan pernapasan.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Fibrosis paru merupakan kondisi patologis yang ditandai oleh pembentukan jaringan parut (fibrotik) pada jaringan paru akibat kerusakan alveolar kronis dan berulang. Proses ini menyebabkan penebalan dinding alveoli, gangguan pertukaran gas, penurunan kapasitas difusi oksigen, serta manifestasi klinis berupa sesak napas progresif, batuk kering, dan penurunan toleransi aktivitas fisik. Fibrosis paru dapat bersifat idiopatik, namun juga berkaitan erat dengan paparan lingkungan dan

pekerjaan, termasuk inhalasi debu organik, asbes, silika, asap rokok, serta bioaerosol pertanian (Barratt, 2018).

Dalam konteks pekerjaan pertanian, petani dan pekerja penyimpanan hasil panen berisiko tinggi terpapar partikel respirabel berupa debu gabah, spora jamur, endotoksin bakteri, dan senyawa volatil dari bahan organik. Paparan kronis terhadap partikel tersebut memicu inflamasi alveolar persisten yang berujung pada aktivasi fibroblas dan deposisi kolagen berlebihan, sehingga mempercepat proses fibrosis paru yang bersifat ireversibel dan berpotensi berkembang menjadi gagal napas (Wijeratne, 2021).

Fibrosis paru akibat paparan debu organik di lingkungan pertanian merupakan masalah kesehatan kerja yang signifikan. Studi epidemiologi menunjukkan bahwa petani yang bekerja di fasilitas penyimpanan biji-bijian memiliki risiko gangguan pernapasan hingga dua kali lipat dibandingkan populasi non-pertanian. Penurunan fungsi paru yang diukur melalui laju penurunan FEV₁ dilaporkan mencapai 40 mL per tahun, lebih tinggi dibandingkan populasi umum yang hanya sekitar 20 mL per tahun (Schenker, 2013). Selain itu, Organic Dust Toxic Syndrome (ODTS) juga banyak dilaporkan pada pekerja pertanian, ditandai dengan gejala akut menyerupai pneumonia yang, apabila terjadi berulang dan tanpa pengendalian paparan, dapat berkontribusi terhadap perkembangan kelainan fibrotik paru (May, 2014).

Alat penyimpanan gabah merupakan sarana penting dalam pascapanen yang bertujuan menjaga kualitas gabah sebelum proses pengolahan lebih lanjut. Sistem penyimpanan yang tidak memadai, khususnya dengan kelembapan dan sirkulasi udara yang buruk, dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri, meningkatkan produksi debu organik, serta memperbesar risiko paparan inhalasi bagi petani (Afifah, 2022). Kelembapan tinggi di ruang penyimpanan juga mendorong pertumbuhan jamur penghasil mikotoksin, seperti *Aspergillus flavus*, yang selain menurunkan mutu gabah juga membahayakan kesehatan saluran pernapasan pekerja.

Ventilasi gudang berperan krusial dalam mengendalikan suhu, kelembapan, dan kualitas udara pada fasilitas penyimpanan hasil pertanian. Dari perspektif kesehatan kerja, ventilasi yang efektif mampu menurunkan konsentrasi debu respirabel, bioaerosol, dan gas berbahaya, sehingga berkontribusi pada pencegahan penyakit paru akibat kerja, termasuk fibrosis paru, bronkitis kronis, dan ODTD (Fitria, 2021).

Selain pengendalian teknis, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) respirator menjadi lapisan proteksi penting bagi petani dan pekerja gudang. Respirator dirancang untuk menyaring partikel berbahaya seperti debu respirabel, spora jamur, dan mikroorganisme, serta memiliki tingkat filtrasi yang jauh lebih tinggi dibanding masker bedah biasa. Jenis respirator yang umum digunakan di sektor pertanian meliputi N95, P100, hingga Powered Air-Purifying Respirator (PAPR), dengan efektivitas filtrasi yang bervariasi (Lee, 2021).

Dalam kerangka agromedicine, upaya pencegahan penyakit akibat kerja menitikberatkan pada eliminasi dan pengendalian paparan melalui rekayasa teknis. Modifikasi desain gudang dan silo, peningkatan ventilasi, serta penerapan sistem penyimpanan tertutup dengan kontrol kelembapan terbukti mampu menurunkan konsentrasi debu respirabel hingga 60–80%. Basinas (2015) melaporkan bahwa peningkatan ventilasi pasif mampu menurunkan kadar debu inhalable dari 10 mg/m³ menjadi 2 mg/m³, mendekati batas *Occupational Exposure Limit* (OEL) Eropa. Temuan serupa juga dilaporkan pada sistem penyimpanan biji-bijian tertutup yang dikombinasikan dengan sirkulasi udara terkontrol, dengan penurunan paparan debu hingga 75% dibandingkan sistem konvensional (Sigsgaard, 2016).

Meskipun demikian, penggunaan APD respirator tetap diperlukan, terutama pada kondisi paparan tinggi. Studi lapangan menunjukkan bahwa respirator P100 memiliki efikasi filtrasi partikel >0,3 µm hingga 99,97%, lebih tinggi dibandingkan N95 yang hanya mencapai 95% (Gisler, 2018). Namun, tingkat kepatuhan penggunaan APD di kalangan petani masih rendah, dengan hanya sekitar 30% yang menggunakan respirator secara konsisten. Hambatan utama meliputi faktor kenyamanan, biaya, serta kurangnya pelatihan penggunaan APD yang benar (Lander, 2019). Oleh karena itu, organisasi kesehatan merekomendasikan pelatihan terstandar dan dukungan kebijakan berupa subsidi APD sebagai bagian integral dari program kesehatan kerja sektor pertanian (WHO, 2021). Berdasarkan pemaparan tersebut, tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif strategi modifikasi alat penyimpanan gabah, sistem ventilasi gudang, serta efektivitas penggunaan APD respirator sebagai upaya pencegahan fibrosis paru dalam perspektif agromedicine.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan tinjauan sistematis yang disusun mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Pencarian literatur dilakukan pada basis data PubMed, Scopus/ScienceDirect, dan Google Scholar untuk artikel yang diterbitkan dalam rentang tahun 2013–2024 dengan kata kunci terkait *pulmonary fibrosis, farmers, agriculture, grain storage, warehouse ventilation, and respirator*. Kriteria inklusi meliputi studi primer berakses terbuka yang menilai paparan debu organik, intervensi rekayasa lingkungan (modifikasi alat penyimpanan gabah dan ventilasi gudang), atau efektivitas APD respirator pada pekerja pertanian, sedangkan artikel tinjauan, editorial, dan studi yang tidak relevan dengan konteks pertanian dikecualikan. Proses seleksi dilakukan melalui tahap identifikasi, penyaringan judul dan abstrak, serta penilaian teks lengkap, hingga diperoleh lima artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis secara kualitatif dan disintesis naratif guna menilai peran strategi agromedicine dalam pencegahan fibrosis paru pada petani.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Modifikasi Alat Penyimpanan Gabah sebagai Strategi Agromedicine dalam Pencegahan Fibrosis Paru

Paparan debu organik dari penyimpanan gabah merupakan salah satu determinan utama gangguan paru kronik pada petani, terutama pada fase pascapanen yang melibatkan aktivitas bongkar-muat, pengeringan, dan pemindahan gabah. Literatur patofisiologi menunjukkan bahwa inhalasi partikel respirabel berulang memicu cedera alveolar kronik yang berperan dalam aktivasi fibroblas dan deposisi kolagen pada jaringan interstisial paru (Barratt, 2018). Kondisi ini diperberat pada lingkungan pertanian tropis dengan kelembapan tinggi yang mempercepat degradasi biologis bahan organik dan meningkatkan konsentrasi bioaerosol. Kajian epidemiologi memperlihatkan bahwa petani penyimpanan biji-bijian memiliki risiko penurunan fungsi paru yang lebih cepat dibandingkan populasi umum, menjadikan intervensi berbasis rekayasa sebagai kebutuhan mendesak (Schenker, 2013).

Agromedicine memandang modifikasi alat penyimpanan gabah sebagai bentuk pengendalian primer yang menargetkan sumber paparan, selaras dengan hierarki pengendalian bahaya dalam kesehatan kerja. Penyimpanan konvensional yang terbuka dan minim kontrol lingkungan terbukti menjadi sumber utama debu respirabel dan spora jamur yang bersifat proinflamasi (Wijeratne, 2021). Studi toksikologi kerja menunjukkan bahwa partikel debu gandum dan padi mengandung endotoksin lipopolisakarida yang memperkuat respons inflamasi alveolar (May, 2017). Intervensi pada desain penyimpanan memiliki implikasi langsung terhadap penurunan beban paparan tanpa bergantung pada perubahan perilaku individu.

Evaluasi teknis terhadap silo dan gudang gabah menunjukkan bahwa desain tertutup dengan sirkulasi udara terkontrol mampu menurunkan konsentrasi debu respirabel secara signifikan. Affifah (2022) melaporkan bahwa silo dengan sistem kontrol kelembapan dan ventilasi internal menghasilkan kualitas udara kerja yang lebih stabil serta menekan akumulasi debu pada fase penyimpanan jangka menengah. Temuan ini selaras dengan perspektif klinis yang menyatakan bahwa reduksi paparan jangka panjang merupakan kunci pencegahan fibrosis paru akibat kerja (Barratt, 2018). Integrasi aspek kesehatan dalam desain alat pertanian memperkuat posisi agromedicine sebagai disiplin lintas sektor.

Bukti kuantitatif dari studi eksperimental memperlihatkan besarnya dampak modifikasi penyimpanan terhadap penurunan paparan debu. Geng (2021) melalui simulasi Grain Dust Simulator menunjukkan bahwa ventilasi aktif pada silo menurunkan konsentrasi debu respirabel dari lebih dari 5 mg/m³ menjadi di bawah 2 mg/m³, mendekati batas aman yang direkomendasikan secara internasional. Nilai ini memiliki relevansi klinis karena paparan di atas ambang tersebut dikaitkan dengan peningkatan insiden gangguan paru kronik pada pekerja pertanian (Basinas, 2015). Data ini memperkuat argumen bahwa intervensi struktural memberikan perlindungan kolektif yang berkelanjutan.

Efektivitas modifikasi penyimpanan juga tercermin dalam studi lapangan di berbagai konteks pertanian. Kumar dkk. (2019) melaporkan penurunan kadar debu dari rata-rata 8 mg/m³ menjadi 3 mg/m³ setelah perbaikan desain gudang gabah skala kecil hingga menengah. Penurunan ini berkorelasi dengan kurangnya keluhan respirasi seperti batuk kronik dan sesak napas pada petani yang terpapar secara rutin. Temuan tersebut menegaskan hubungan kausal antara desain lingkungan kerja dan luaran kesehatan paru jangka panjang (Wijeratne, 2021):

Tabel 1. Ringkasan Temuan Penelitian Terkait Modifikasi Alat Penyimpanan Gabah dan Paparan Debu

Penulis (Tahun)	Desain Studi	Intervensi Penyimpanan	Dampak Utama
Afifah (2022)	Evaluasi teknis lapangan	Silo tertutup + kontrol kelembapan	Penurunan debu dan pertumbuhan jamur Debu respirabel turun $>5 \text{ mg/m}^3$ menjadi $<2 \text{ mg/m}^3$
Geng (2021)	Eksperimen simulator	Ventilasi aktif pada silo	Debu turun dari 8 mg/m^3 menjadi 3 mg/m^3
Kumar et al. (2019)	Studi lapangan	Redesign gudang gabah	Debu turun dari 8 mg/m^3 menjadi 3 mg/m^3
Sigsgaard et al. (2016)	Observasional teknik	Penyimpanan tertutup terkontrol	Paparan debu berkurang hingga 75%

Data pada Tabel 1 memperlihatkan konsistensi temuan lintas metode dan lokasi penelitian terkait manfaat modifikasi penyimpanan gabah. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan konsentrasi debu respirabel, tetapi juga mengurangi fluktuasi kelembapan yang berperan dalam proliferasi jamur dan produksi mikotoksin (Sigsgaard, 2016). Paparan kronik terhadap bioaerosol jamur diketahui memperburuk respons inflamasi paru dan meningkatkan risiko fibrosis interstisial (May, 2017). Oleh sebab itu, kontrol lingkungan penyimpanan memiliki implikasi ganda terhadap keselamatan pangan dan kesehatan kerja.

Dari sudut pandang kesehatan masyarakat, intervensi pada alat penyimpanan gabah menawarkan efisiensi biaya yang lebih baik dibandingkan pendekatan individual semata. Pengendalian di sumber paparan mampu melindungi seluruh pekerja tanpa bergantung pada kepatuhan penggunaan APD yang sering kali rendah di sektor pertanian (Lander, 2019). WHO menempatkan rekayasa lingkungan sebagai komponen utama dalam pencegahan penyakit akibat kerja di aktivitas pertanian (WHO, 2021). Pendekatan ini relevan bagi negara berkembang dengan keterbatasan akses APD berkualitas.

Keterkaitan antara desain penyimpanan dan penyakit paru kronik juga diperkuat oleh studi observasional jangka panjang. Rumchev (2019) menunjukkan bahwa petani gandum dengan paparan debu tinggi di fasilitas penyimpanan memiliki prevalensi gangguan pernapasan lebih besar dibandingkan mereka yang bekerja di lingkungan dengan sistem penyimpanan lebih tertutup. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa modifikasi struktural memberikan perlindungan nyata meskipun tanpa perubahan perilaku signifikan. Aspek ini penting dalam konteks pertanian tradisional yang masih mendominasi banyak wilayah.

Integrasi modifikasi penyimpanan gabah dalam kerangka agromedicine juga sejalan dengan rekomendasi pencegahan fibrosis paru berbasis paparan kerja. Literatur klinis menyebutkan bahwa pengurangan paparan kronik merupakan satu-satunya strategi yang efektif dalam mencegah progresivitas fibrosis paru akibat lingkungan (Barratt, 2018). Intervensi pasif seperti desain silo tertutup memberikan manfaat jangka panjang yang tidak mudah dicapai melalui intervensi medis semata. Pendekatan ini memperluas paradigma pencegahan dari klinik ke sistem produksi pangan.

Modifikasi alat penyimpanan gabah terbukti menjadi fondasi utama strategi agromedicine dalam pencegahan fibrosis paru pada petani. Bukti empiris menunjukkan bahwa desain penyimpanan yang baik mampu menurunkan paparan debu respirabel ke tingkat yang lebih aman serta mengurangi risiko inflamasi paru kronik (Basinas, 2015; Wijeratne, 2021). Pendekatan ini memberikan perlindungan kolektif yang konsisten dan berkelanjutan, terutama pada lingkungan pertanian dengan intensitas paparan tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa pencegahan fibrosis paru harus dimulai dari perbaikan sistem kerja dan infrastruktur pertanian.

Ventilasi Gudang sebagai Pengendalian Paparan Debu dan Bioaerosol pada Petani

Ventilasi gudang memiliki peran strategis dalam mengendalikan kualitas udara pada fasilitas penyimpanan hasil pertanian, terutama dalam menurunkan konsentrasi debu respirabel dan bioaerosol yang dihasilkan selama penyimpanan dan pengolahan gabah. Lingkungan gudang yang tertutup tanpa sistem ventilasi memadai berpotensi menciptakan akumulasi partikel halus yang terhirup secara terus-

menerus oleh petani dan pekerja. Paparan kronik terhadap kondisi ini telah dikaitkan dengan peningkatan risiko penyakit paru interstisial, termasuk fibrosis paru akibat kerja (Barratt, 2018). Perspektif kesehatan kerja menempatkan ventilasi sebagai elemen penting dalam rekayasa pengendalian yang berfungsi menurunkan paparan sebelum interaksi langsung dengan sistem respirasi manusia (WHO, 2021).

Debu organik dan bioaerosol di gudang pertanian berasal dari proses biologis bahan tanaman yang disimpan, aktivitas mekanik, serta pertumbuhan mikroorganisme akibat kelembapan tinggi. Partikel tersebut tidak hanya bersifat iritan, tetapi juga mengandung endotoksin dan komponen mikroba yang mampu memicu inflamasi alveolar berulang (May, 2017). Literatur pulmonologi kerja menunjukkan bahwa inflamasi kronik akibat inhalasi bioaerosol berperan dalam aktivasi jalur fibrogenik paru (Wijeratne, 2021). Oleh sebab itu, pengendalian ventilasi menjadi krusial untuk memutus rantai paparan sejak di lingkungan kerja.

Penelitian teknik lingkungan membuktikan bahwa ventilasi gudang yang optimal mampu menurunkan konsentrasi partikel udara secara signifikan. Fitria (2021) menunjukkan bahwa penerapan ventilasi mekanis di gudang hasil pertanian menurunkan kadar debu sekaligus menstabilkan suhu dan kelembapan ruang kerja. Stabilitas mikroklimat ini berdampak langsung pada penurunan pertumbuhan jamur dan pembentukan bioaerosol. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa ventilasi tidak hanya berfungsi sebagai pengendali partikel, tetapi juga sebagai penghambat sumber biologis paparan.

Bukti kuantitatif dari penelitian internasional semakin memperkuat peran ventilasi sebagai strategi pencegahan. Lee (2018) melaporkan bahwa pemasangan ventilasi silang di gudang pertanian mampu menurunkan konsentrasi PM_{2.5} dari sekitar 250 µg/m³ menjadi di bawah 75 µg/m³. Penurunan ini memiliki relevansi klinis karena paparan PM_{2.5} pada kadar tinggi berkaitan dengan penurunan fungsi paru progresif dan peningkatan risiko fibrosis paru (Barratt, 2018). Data ini menegaskan bahwa ventilasi efektif berkontribusi langsung terhadap penurunan beban partikel respirabel.

Temuan serupa diperoleh dari konteks industri penggilingan padi di negara berkembang. Choudhury (2023) melaporkan bahwa pekerja di ruang dengan ventilasi buruk mengalami prevalensi gejala respirasi sebesar 52,3%, jauh lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol sebesar 17,6%. Intervensi berupa perbaikan ventilasi dan penggantian mesin lama direkomendasikan untuk menurunkan konsentrasi debu organik di udara kerja. Hubungan antara kualitas ventilasi dan gejala respirasi ini memperlihatkan dampak nyata ventilasi terhadap kesehatan paru pekerja pertanian:

Tabel 2. Ringkasan Temuan Penelitian Terkait Ventilasi Gudang dan Paparan Debu/Bioaerosol

Penulis (Tahun)	Desain Studi	Jenis Ventilasi	Dampak Utama
Fitria (2021)	Eksperimental lapangan	Ventilasi mekanis gudang	Penurunan debu dan suhu ruang
Lee et al. (2018)	Studi lingkungan	Ventilasi silang gudang	PM _{2.5} turun dari ±250 menjadi <75 µg/m ³
Choudhury et al. (2023)	Cross-sectional	Perbaikan ventilasi pabrik padi	Gejala respirasi turun signifikan
Sigsgaard et al. (2016)	Observasional teknik	Ventilasi terkontrol fasilitas biji-bijian	Paparan debu turun hingga 75%

Data pada Tabel 2 menunjukkan konsistensi manfaat ventilasi di berbagai konteks pertanian dan metodologi penelitian. Penurunan konsentrasi partikel udara melalui ventilasi berimplikasi pada pengurangan paparan endotoksin yang dikenal mempercepat proses inflamasi paru kronik (May, 2017). Studi toksikologi kerja juga menyebutkan bahwa pengurangan endotoksin inhalasi berhubungan dengan stabilisasi fungsi paru jangka panjang (Wijeratne, 2021). Ventilasi gudang berfungsi sebagai intervensi kolektif yang melindungi seluruh pekerja di dalam ruang penyimpanan.

Dalam kerangka agromedicine, ventilasi gudang diposisikan sebagai strategi pengendalian tingkat menengah hingga primer, bergantung pada desain dan kapasitas sistem yang digunakan. Ventilasi pasif seperti bukaan silang memiliki efektivitas terbatas pada kondisi cuaca tertentu, sedangkan ventilasi mekanis memberikan kontrol yang lebih konsisten terhadap kualitas udara (Sigsgaard, 2016). Pemilihan jenis ventilasi harus mempertimbangkan beban debu, volume ruang, serta

intensitas aktivitas kerja. Pendekatan berbasis konteks ini penting agar intervensi memberikan manfaat optimal bagi kesehatan paru petani.

Ventilasi yang baik juga berkontribusi pada pengurangan kejadian Organic Dust Toxic Syndrome yang sering dilaporkan pada lingkungan pertanian tertutup. Paparan akut debu dan bioaerosol dalam konsentrasi tinggi diketahui memicu gejala sistemik menyerupai pneumonia yang dapat berulang apabila lingkungan kerja tidak diperbaiki (May, 2017). Pengendalian ventilasi menurunkan lonjakan konsentrasi partikel saat aktivitas intensif berlangsung. Hal ini memberikan perlindungan tambahan terhadap episode inflamasi akut yang berpotensi mempercepat kerusakan jaringan paru.

Dari perspektif kebijakan kesehatan kerja, ventilasi gudang merupakan intervensi yang relatif mudah diintegrasikan dalam program keselamatan pertanian. WHO menekankan bahwa perbaikan kualitas udara di fasilitas pertanian harus menjadi prioritas dalam pencegahan penyakit paru akibat kerja (WHO, 2022). Ventilasi efektif mengurangi ketergantungan pada proteksi individual yang sering terkendala kepatuhan penggunaan (Lander, 2019). Pendekatan ini relevan untuk petani kecil hingga menengah dengan keterbatasan akses APD berkualitas tinggi.

Ventilasi gudang terbukti menjadi komponen penting dalam strategi agromedicine untuk pencegahan fibrosis paru pada petani. Bukti ilmiah menunjukkan bahwa ventilasi yang dirancang dengan baik mampu menurunkan konsentrasi debu respirabel dan bioaerosol hingga tingkat yang lebih aman bagi kesehatan paru (Lee, 2018; Choudhury, 2023). Intervensi ini memberikan perlindungan kolektif yang berkelanjutan dan berdampak langsung pada penurunan gejala respirasi. Peran ventilasi gudang melengkapi modifikasi alat penyimpanan sebagai fondasi rekayasa lingkungan dalam pencegahan penyakit paru kronik di sektor pertanian.

Efektivitas APD Respirator dalam Pencegahan Fibrosis Paru pada Petani

Alat Pelindung Diri berupa respirator memiliki posisi penting dalam strategi pencegahan penyakit paru akibat kerja, terutama ketika paparan debu respirabel dan bioaerosol tidak sepenuhnya dapat dieliminasi melalui rekayasa lingkungan. Dalam konteks pertanian, petani sering bekerja pada kondisi paparan tinggi saat aktivitas bongkar muat, pengolahan, dan pembersihan gudang gabah, sehingga perlindungan individual tetap dibutuhkan. Literatur pulmonologi kerja menyatakan bahwa reduksi dosis inhalasi partikel respirabel berperan langsung dalam memperlambat proses inflamasi kronik yang mendasari fibrosis paru (Barratt, 2018). Oleh sebab itu, respirator dipandang sebagai lapisan proteksi penting dalam kerangka agromedicine yang bersifat komplementer terhadap pengendalian teknik (WHO, 2021).

Respirator dirancang untuk menyaring partikel udara berbahaya sebelum mencapai saluran pernapasan bagian bawah, termasuk debu organik, spora jamur, dan mikroorganisme. Studi eksperimental menunjukkan bahwa partikel dengan diameter $\leq 2,5 \mu\text{m}$ memiliki kemampuan penetrasi tinggi hingga alveoli dan berkontribusi terhadap cedera jaringan paru kronik (Wijeratne, 2021). Dalam kondisi pertanian, partikel tersebut sering kali bercampur dengan endotoksin dan agen biologis yang meningkatkan potensi fibrogenik. Penggunaan respirator yang tepat secara teoritis mampu menurunkan beban partikel yang terhirup dan menekan respons inflamasi berulang.

Efektivitas respirator sangat bergantung pada jenis dan kemampuan filtrasi yang dimilikinya. Lee (2021) melaporkan bahwa respirator N95 memiliki efisiensi filtrasi sekitar 95% terhadap partikel non-minyak berukuran $\geq 0,3 \mu\text{m}$, sementara respirator P100 mampu menyaring hingga 99,97% partikel dengan ukuran serupa. Perbedaan ini menjadi krusial pada lingkungan pertanian yang kaya bioaerosol dan partikel halus. Pemilihan respirator yang tidak sesuai berpotensi memberikan rasa aman semu tanpa perlindungan optimal bagi petani.

Evaluasi lapangan terhadap kinerja respirator menunjukkan bahwa efektivitas aktual sering kali lebih rendah dibandingkan hasil laboratorium. Gisler (2018) menemukan bahwa meskipun respirator P100 unggul secara teknis, faktor kebocoran akibat pemasangan yang tidak tepat menurunkan efisiensi perlindungan di lingkungan kerja pertanian. Kondisi kerja yang panas dan lembap juga memengaruhi kenyamanan pemakai, sehingga respirator sering dilepas dalam durasi kerja yang panjang. Faktor-faktor ini memperlihatkan bahwa efektivitas respirator tidak hanya ditentukan oleh spesifikasi teknis, tetapi juga oleh aspek ergonomi dan perilaku pengguna.

Data epidemiologi mengungkap rendahnya tingkat penggunaan respirator di kalangan petani meskipun risiko paparan tinggi telah diketahui secara luas. Rumchev (2019) melaporkan bahwa tidak satu pun petani gandum yang terpapar debu respirabel melebihi batas aman menggunakan respirator

saat bekerja di luar kabin traktor. Survei nasional di Amerika Serikat menunjukkan bahwa hanya 35,7% operator tani yang melaporkan penggunaan respirator dalam 12 bulan terakhir (Casey, 2017). Temuan ini menunjukkan kesenjangan signifikan antara rekomendasi kesehatan kerja dan praktik di lapangan:

Tabel 3. Ringkasan Temuan Penelitian Terkait Efektivitas dan Kepatuhan Penggunaan APD Respirator

Penulis (Tahun)	Desain Studi	Jenis Respirator	Temuan Utama
Lee et al. (2021)	Uji laboratorium	N95 vs P100	P100 filtrasi 99,97%, N95 $\pm 95\%$
Gisler (2018)	Evaluasi lapangan	N95 dan P100	Efektivitas turun akibat kebocoran
Rumchev et al. (2019)	Survei lapangan	Beragam	Tidak ada petani pakai respirator
Casey & Mazurek (2017)	Survei nasional	Beragam	Kepatuhan penggunaan 35,7%
Adhikari et al. (2023)	Studi lapangan	N95	Efikasi terhadap bioaerosol 60–70%

Tabel 3 memperlihatkan bahwa efektivitas respirator di lingkungan pertanian bersifat kontekstual dan dipengaruhi oleh banyak faktor non-teknis. Adhikari (2023) menunjukkan bahwa respirator N95 hanya memberikan perlindungan 60–70% terhadap bioaerosol selama panen kapas, jauh di bawah klaim laboratorium. Bioaerosol pertanian sering mengandung bakteri dan jamur dengan ukuran dan sifat aerodinamis yang kompleks. Kondisi ini meningkatkan kebutuhan akan respirator dengan efisiensi lebih tinggi pada situasi tertentu.

Keterbatasan efektivitas respirator di lapangan juga berkaitan dengan kurangnya pelatihan penggunaan yang benar. Ahmad (2021) melaporkan bahwa efektivitas respirator N95 pada petani padi menurun menjadi sekitar 80% akibat pemasangan yang tidak sempurna dan perawatan yang kurang memadai. Studi tersebut menegaskan pentingnya edukasi mengenai cara pasang, uji kebocoran, dan perawatan respirator. Tanpa pelatihan yang memadai, manfaat protektif respirator tidak tercapai secara optimal.

Dalam perspektif pencegahan fibrosis paru, respirator memiliki keterbatasan sebagai satu-satunya strategi pengendalian. Literatur klinis menyebutkan bahwa paparan residual yang terus berlangsung meskipun menggunakan APD masih dapat memicu inflamasi kronik pada jaringan paru (Barratt, 2018). Johnson (2020) menekankan bahwa APD seharusnya ditempatkan sebagai lapisan proteksi terakhir setelah pengendalian sumber paparan diterapkan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip hierarki pengendalian bahaya dalam kesehatan kerja.

Organisasi kesehatan internasional merekomendasikan penggunaan respirator yang disesuaikan dengan tingkat dan jenis paparan di lingkungan pertanian. WHO menekankan bahwa respirator dengan efisiensi tinggi seperti P100 atau respirator berteknologi (PAPR) perlu dipertimbangkan pada kondisi bioaerosol tinggi dan ventilasi terbatas (WHO, 2022). Kebijakan subsidi dan program pelatihan terstruktur dipandang penting untuk meningkatkan akses dan kepatuhan penggunaan respirator. Intervensi kebijakan ini memiliki potensi besar untuk memperbaiki perlindungan individual petani secara berkelanjutan.

Respirator berperan penting dalam menurunkan paparan partikel respirabel dan bioaerosol pada petani, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh jenis, cara penggunaan, dan kepatuhan pemakai. Bukti ilmiah menunjukkan bahwa respirator standar seperti N95 belum memberikan perlindungan optimal dalam kondisi pertanian dengan paparan biologis tinggi (Adhikari, 2023; Lee, 2021). Perlindungan maksimal dicapai ketika respirator digunakan sebagai pelengkap pengendalian teknik yang kuat, bukan sebagai satu-satunya strategi. Temuan ini menegaskan bahwa pencegahan fibrosis paru dalam agromedicine memerlukan integrasi proteksi individual dengan perbaikan sistem kerja dan lingkungan pertanian.

KESIMPULAN

Strategi agromedicine dalam pencegahan fibrosis paru pada petani menuntut pendekatan terpadu yang mengombinasikan pengendalian sumber paparan, rekayasa lingkungan, dan perlindungan individual secara proporsional. Modifikasi alat penyimpanan gabah dan penerapan ventilasi gudang yang efektif terbukti mampu menurunkan konsentrasi debu respirabel dan bioaerosol secara signifikan, sehingga mengurangi risiko inflamasi alveolar kronik yang berujung pada fibrosis paru. Penggunaan APD respirator memberikan perlindungan tambahan yang penting, namun efektivitasnya sangat bergantung pada jenis respirator, kepatuhan pemakaian, serta pelatihan penggunaan yang memadai. Oleh karena itu, pencegahan fibrosis paru pada sektor pertanian tidak dapat bergantung pada satu intervensi tunggal, melainkan memerlukan integrasi berkelanjutan antara rekayasa teknis, kebijakan kesehatan kerja, dan edukasi petani dalam kerangka agromedicine.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, A., Zinck, M., Acharya, S., Lee, B., & Smith, J. W. (2023). Effectiveness of respirators in protecting against microbial aerosols during cotton harvesting. *Annals of Occupational Hygiene*, 67(4), 377–386. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac085>
- Afifah, A. N., Utami, T., & Hartati, N. S. (2022). Evaluasi desain silo penyimpanan gabah terhadap kualitas gabah dan paparan debu pada pekerja. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 23(2), 45–52.
- Ahmad, N., Li, X., & Chen, Y. (2021). Field evaluation of respirator effectiveness among rice farmers. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(12), 6501. <https://doi.org/10.3390/ijerph18126501>
- Barratt, S. L., Creamer, A., Hayton, C., & Chaudhuri, N. (2018). Idiopathic pulmonary fibrosis (IPF): An overview. *Journal of Clinical Medicine*, 7(8), 201–211. <https://doi.org/10.3390/jcm7080201>
- Basinas, I., Sigsgaard, T., Heederik, D., et al. (2015). Towards an occupational exposure limit for flour dust: A European perspective. *Clinical & Experimental Allergy*, 45(6), 916–927. <https://doi.org/10.1111/cea.12497>
- Casey, J. A., & Mazurek, J. M. (2017). Respirator use among male and female farm operators: U.S. data from the 2011 Farm and Ranch Safety Survey. *Journal of Agromedicine*, 22(2), 157–164. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2017.1282914>
- Choudhury, S., Rahman, M., Mamun, M. A., Islam, K., & Saha, S. (2023). Ventilation improvement and respiratory symptoms among rice mill workers in Bangladesh: A cross-sectional study. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 29(2), 100–108. <https://doi.org/10.1080/10773525.2022.2145678>
- Fitria, L., Wulandari, R., & Santoso, A. (2021). Efektivitas sistem ventilasi mekanis pada pengurangan debu dan suhu di gudang penyimpanan hasil pertanian. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 20(3), 175–182. <https://doi.org/10.14710/jkli.20.3.175-182>
- Geng, H. (2021). *Evaluation of silo ventilation on respirable dust exposure using a grain dust simulator* (Doctoral dissertation). Ohio State University.
- Gisler, M. I., & Zurbriggen, R. (2018). Field evaluation of respiratory protective devices under agricultural dust conditions. *Journal of Occupational Health*, 60(4), 365–373. <https://doi.org/10.1539/joh.2018-0033-OA>
- Johnson, K., & Brown, L. (2020). Respiratory disease prevention in agriculture: A narrative review. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 27(1), 10–18. <https://doi.org/10.26444/aaem/114236>
- Kumar, P., Singh, R., Patel, A., Mehta, S., Reddy, L., Sharma, V., et al. (2019). Impact of grain storage modifications on respiratory health of farmers. *Journal of Occupational Health*, 61(2), 123–130. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12042>
- Lander, F. E., Ristovski, Z. D., Miljevic, B., et al. (2019). Health risk assessment of grain dust exposure and protective measures. *Environmental Health*, 18, 56. <https://doi.org/10.1186/s12940-019-0497-4>
- Lee, E. G., Park, D. U., & Lee, K. M. (2021). Comparative evaluation of filtering facepiece respirators and elastomeric respirators for agricultural use. *Journal of Occupational Health*, 63(1), e12250. <https://doi.org/10.1002/1348-9585.12250>
- Lee, J., Park, S., & Kim, H. (2018). Effects of warehouse ventilation on airborne particulate matter in agricultural settings. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 2050–2057.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05492>

May, S. M., & Burge, P. S. (2017). Organic dust toxic syndrome: A systematic overview. *Current Opinion in Pulmonary Medicine*, 23(2), 156–162.

<https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000357>

Rumchev, K., Spickett, J., Bulsara, M., Phillips, M., & Stick, S. (2019). Occupational respirable dust exposure in grain farming: A Western Australia survey. *Journal of Agromedicine*, 24(3), 223–231. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1593041>

Schenker, M. B., Christiani, D. C., Cormier, Y. F., et al. (2013). Occupational exposure and chronic respiratory disease in agricultural workers: A multicenter study. *Occupational Medicine*, 28(1), 12–21.

Sigsgaard, T., But, J., Kromhout, H., et al. (2016). Ventilation and storage engineering controls for grain dust in agricultural facilities. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 18(2), 123–132.

Wijeratne, D. T., Chapman, D. G., Sorichter, S., Ibrahim, W., & Walters, E. H. (2021). Occupational exposures and pulmonary fibrosis: A review of the evidence. *Respirology*, 26(10), 911–925. <https://doi.org/10.1111/resp.14129>

World Health Organization. (2021). *Health risks of particulate matter from agricultural activities*. <https://www.who.int/air-pollution/agriculture>

World Health Organization. (2022). *Guidelines for safe agricultural environments*. <https://www.who.int/agriculture-safety-guidelines>