OPEN ACCESS

AR-PMLENS: DESAIN DAN PENGEMBANGAN APLIKASI *AUGMENTED REALITY* UNTUK MENINGKATKAN KEWASPADAAN TERHADAP BAHAYA PARTIKULAT YANG TIDAK TERLIHAT

Hulwah Shalihah[1], Difa Nasywa Budi Ghafara[2], Zhafirah Nauli Irhami Siregar[3]

[1, 2, 3] Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

Email: hulwahsh17@gmail.com[1], difaghafara@gmail.com[2], zhafirahsiregar@gmail.com[3]

ABSTRAK

Particulate Hazards merupakan bahaya yang sering kali tidak diperhatikan di lingkungan kerja karena sifatnya yang tidak terlihat membuat pekerja mengabaikan risikonya. ILO (2021) mencatat sekitar 450.000 kematian disebabkan oleh pajanan *particulate hazards* seperti partikel, gas, dan asap. Kurangnya gambaran pekerja terhadap *particulate hazards* mempengaruhi *safety behavior*. Penelitian ini bertujuan mengembangkan konsep awal aplikasi *Augmented Reality* (AR) untuk memvisualisasikan *Particulate Matter* (PM) di lingkungan kerja *indoor* sebagai media intervensi bagi tim HSE dalam mempromosikan *safety behavior* di lingkungan kerja. Penelitian ini menggunakan metode *design and development research* berbasis *literature review* untuk merancang konsep awal aplikasi AR PMlens. Aplikasi ini memvisualisasikan konsentrasi PM10 dan PM2.5 berbasis interpolasi *Inverse Distance Weighted* (IDW), ditampilkan melalui pemindaian QR Code, serta dilengkapi informasi Nilai Ambang Batas (NAB), dampak kesehatan, dan rekomendasi pengendalian. Efektivitas aplikasi dianalisis menggunakan pendekatan ABC Model (*Antecedent–Behavior–Consequence*) terkait *safety behavior* pekerja. Berdasarkan *literature review*, aplikasi AR PMlens dapat berperan sebagai pemicu atau *antecedent* dalam ABC Model. AR PMlens ini akan menstimulasi persepsi pekerja tentang *particulate hazards* sehingga dapat membentuk *safety behaviour*. Aplikasi ini dapat menjadi rekomendasi bagi perusahaan dengan risiko tinggi terhadap pajanan *particulate hazard* sebagai media visual dalam upaya pembentukan dan peningkatan *safety behaviour* di lingkungan kerja.

Kata kunci: *Safety Behavior, Particulate Hazards, Augmented Reality*.

ABSTRACT

Particulate Hazards often go unnoticed in the workplace because of their invisible nature makes workers ignore the risks. According to ILO 2021, around 450,000 deaths globally are linked to particulate exposure such as dust, gases, and fumes. Limited awareness of these hazards negatively impacts safety behavior. This research aims to develop an concept of Augmented Reality (AR) application to visualize Particulate Matter (PM) in indoor work environments as an intervention tool for HSE teams in promoting workplace safety behavior. This research uses a literature review-based design and development research method to design the initial concept of AR PMlens application. AR PMlens visualizes PM10, PM2.5 concentrations based on Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation, displayed through QR Code, and equipped

with Threshold Limit Value (TLV), health effect, and recommendations. The effectiveness of the application is analyzed using the ABC Model (Antecedent-Behavior-Consequence) that is related to safety behavior. Based on the literature review, the AR PMlens application can act as an antecedent in the ABC Model, it stimulates workers' perceptions of particulate hazards so that they can form safety behavior. This application offers a practical solution for high-risk workplaces to enhance hazard awareness and foster safer behavior through visualization.

Keywords: *Safety Behavior, Particulate Hazards, Augmented Reality.*

PENDAHULUAN

Particulate Hazards merupakan bahaya yang sering kali tidak diperhatikan di lingkungan kerja karena sifatnya yang tidak terlihat membuat pekerja mengabaikan risikonya. Salah satu bentuk dari *particulate hazards* adalah *particulate matter* (PM), yang dihasilkan dari berbagai proses industri seperti pembakaran bahan bakar, pengelasan, pemotongan logam, hingga reaksi kimia tertentu. Berbagai sektor industri di tingkat global menghasilkan *particulate matter* (PM) sebagai hasil samping dari proses operasionalnya, terutama PM10, PM2,5. *Particulate matter* bersifat mikroskopis dan dapat tetap melayang di udara dalam jangka waktu lama, sehingga mudah terhirup dan berdampak pada kesehatan pekerja. Polusi udara akibat *particulate matter* (PM) menjadi ancaman serius bagi kesehatan global. WHO dan ILO (2021) mencatat sekitar 1,9 juta kematian akibat faktor yang berkaitan proses dan lingkungan kerja setiap tahunnya, yang mana sekitar 450.000 kematian disebabkan oleh pajanan *particulate hazards* seperti termasuk *particulate matter*, *gas*, dan *fumes*. Pada tahun 2021, secara global penyakit pneumokoniosis akibat paparan partikulat di tempat kerja menyumbang sekitar 4.775 kematian dan 117.800 *disability-adjusted life years* (DALYs).

Di Indonesia, khususnya Jakarta, polusi udara diperkirakan menyebabkan lebih dari 10.000 kematian dan ribuan kasus penyakit jantung-paru setiap tahun, serta berdampak buruk pada kesehatan anak-anak. Kerugian ekonomi akibat dampak kesehatan tersebut mencapai USD 2,94 miliar per tahun (Syuhada et al., 2023). Menurut data kasus kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja Kementerian Ketenagakerjaan tahun (2019-2021) BPJS Ketenagakerjaan yang mendata kesehatan 34% pekerja di Indonesia menunjukkan bahwa terdapat sebanyak 355 orang pekerja yang mengalami dampak kesehatan dari pengisapan bahaya partikulat di tempat kerja, yaitu proses masuknya bahan atau zat berbahaya ke dalam tubuh melalui pernapasan yang pada umumnya berakibat sesak nafas, keracunan, mati lemas, dan lainnya. Selain itu, melihat data dari KEMNAKER ada beberapa penyakit akibat kerja yang disebabkan oleh bahaya partikulat dan perlu diwaspadai yaitu penyakit Paru Obstruktif Kronis (PPOK) dan Pneumoconiosis, hal ini menunjukkan betapa berbahayanya dampak dari bahaya partikulat terhadap kesehatan pekerja.

Berdasarkan data dari salah satu perusahaan industri semen, tercatat bahwa konsentrasi debu partikulat (PM10) di ruang pengepakan semen mencapai 1002,3 µg/m³, sementara di ruang pembuatan kantong semen mencapai 142,1 µg/m³. Angka ini jauh melebihi ambang batas yang direkomendasikan. Tingginya paparan ini berdampak pada kesehatan pekerja, di mana hasil penelitian menunjukkan bahwa 63,9% pekerja di unit pengepakan semen dan 54% di unit pembuatan kantong mengalami gangguan saluran pernapasan dan iritasi mata (Ferial et al., 2021). Selain itu, pada industri pembangkit listrik, terutama yang menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara juga ditemukan

tingginya konsentrasi PM2,5 melebihi nilai baku mutu nasional hariannya, yaitu 65 µg/m³ (Hutauruk et al., 2021). Berbagai kondisi di atas menunjukkan bahwa meskipun risiko *particulate hazard* di tempat kerja cukup tinggi, tetapi masih banyak pekerja belum memiliki gambaran nyata terhadap bahaya yang mereka hadapi karena partikulat bersifat tidak kasat mata. Hal ini membuat pekerja cenderung mengabaikan tindakan pencegahan di tempat kerja. Kurangnya gambaran pekerja terhadap *particulate hazards* mempengaruhi *safety behavior*. *Safety behaviour* merupakan tindakan untuk mengurangi risiko terjadinya kecelakaan kerja (Fitriani et al., 2020) atau lebih sederhana dianggap sebagai perilaku yang selamat (*safe act*). *Safety behaviour* ini dapat dianalisis menggunakan model ABC, model ini terdiri dari 3 komponen, yaitu *antecedent*, *behaviour*, dan *consequence*. Perilaku dipengaruhi langsung oleh *antecedent*, lalu *behavior* adalah setiap hal yang dapat diukur langsung yang dilakukan oleh pekerja, dan *consequence* adalah hal yang menentukan perilaku tersebut akan terulang kembali atau tidak (Novian et al., 2018).

Kurangnya representasi visual terhadap bahaya *particulate matter* menjadi salah satu hambatan dalam membangun *safety behavior* pada pekerja. Untuk menjembatani hambatan tersebut, dibutuhkan inovasi teknologi yang mampu memberikan visualisasi berbasis data terhadap keberadaan *particulate matter* yang ada di lingkungan kerja. Untuk itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan konsep awal aplikasi *Augmented Reality* (AR) untuk memvisualisasikan *Particulate Matter* (PM) di lingkungan kerja *indoor* sebagai media intervensi bagi tim *Health and Safety Environment* (HSE) dalam mempromosikan *safety behavior* di lingkungan kerja. Visualisasi yang mudah dipahami, memudahkan tim HSE dalam menyampaikan informasi bahaya kepada pekerja, memperkuat komunikasi risiko, yang mana mendukung peningkatan kepatuhan terhadap prosedur keselamatan. Pemanfaatan teknologi *Augmented Reality*, mampu menggabungkan data spasial dengan visualisasi secara *real time* (Sanità et al., 2024).

Pada penelitian sebelumnya, yang dilakukan di wilayah Marche, Italia, teknologi yang memanfaatkan AR berhasil menunjukkan bahwa AR mampu meningkatkan kesadaran individu terhadap kualitas udara serta mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik terkait perilaku sehat sehari-hari (Sanità et al., 2024). Sementara itu, di Polandia, prototipe aplikasi AR serupa juga diujicobakan dalam sebuah acara publik di kota Myszków yang mempromosikan perilaku memperbaiki lingkungan. Partisipan yang sebagian besar adalah orang tua dan anak-anak secara spontan tertarik mencoba aplikasi saat melihat poster yang tertera (Grzegorz Pochwatko et al., 2023). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sebagian besar peserta secara aktif menjelajahi area yang divisualisasikan dengan lapisan polusi, meskipun pengamatan mendalam terhadap organ paru-paru digital yang memperlihatkan penumpukan polutan cenderung dihindari. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis AR tidak hanya mampu menarik perhatian, tetapi juga mendorong kesadaran dan pemahaman yang lebih dalam terkait paparan polusi serta dampaknya terhadap kesehatan. Dengan demikian, kami mengusungkan sebuah aplikasi bernama AR PMlens yang merupakan aplikasi berbasis *augmented reality* yang dirancang untuk memvisualisasikan keberadaan *particulate matter* di lingkungan kerja sesuai lokasi disertai secara *real time*.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *design and development research* berbasis *literature review*. Metode penelitian pengembangan merupakan metode yang digunakan dalam mengembangkan suatu alat, produk atau inovasi untuk pengembangan ke arah yang lebih baik (Borg & Gall, 2003). Pada penelitian ini peneliti menggunakan metode *design and development research* atau D&D untuk mengembangkan teknologi *Augmented Reality* (AR) sebagai inovasi untuk memvisualisasikan bahaya partikulat di tempat kerja yang selanjutnya diharapkan dapat membantu meningkatkan kesadaran dan pengetahuan terkait kehadiran bahaya partikulat di tempat kerja yang berisiko memberikan dampak kesehatan bagi pekerja, juga untuk meningkatkan perilaku selamat atau *safety behavior* pekerja melalui *work safety knowledge* pekerja (Maulidy & Ratnawati, 2023). Sementara itu, data diperoleh dengan metode deskriptif atau *literature review* dari berbagai sumber tertulis seperti *e-book*, artikel jurnal, *website* resmi organisasi nasional bahkan global, dan penelitian sebelumnya yang juga relevan dengan topik ini.

Proses pengumpulan data dilakukan pada bulan April-Mei 2025, literatur yang dipilih mencakup publikasi dalam rentang waktu lima tahun terakhir (2019-2024) untuk memastikan data dan informasi yang digunakan bersifat terbaru dan relevan dengan perkembangan teknologi, kebijakan, praktik K3, juga status kesehatan saat ini. Selanjutnya setelah mendapat berbagai data dari literatur yang berkaitan, penelitian dengan metode D&D dilakukan melalui berbagai tahapan yang mengacu pada model ADDIE (*Analyze, Design, Development, Implementation, and Evaluation*) yang diadaptasi kemudian dimodifikasi dari model instruksional Braden (1996). Penggunaan model ADDIE di dasari pada efektivitas dan efisiensi dalam mencapai tujuan penelitian (Branch 2009).

Pada tahap *Analyze*, peneliti mengumpulkan dan menganalisis informasi yang meliputi data kesehatan, studi lapangan, dan studi literatur. Pada tahap ini peneliti menganalisis apakah memang diperlukan adanya inovasi dari teknologi *Augmented Reality* (AR) untuk membantu memvisualisasikan bahaya partikulat yang ada di lingkungan kerja. Selain itu, peneliti juga perlu menganalisis data nasional tentang dampak kesehatan *particulate hazards*, dan mengkaji efektivitas media visual dengan *safety behavior* pekerja.

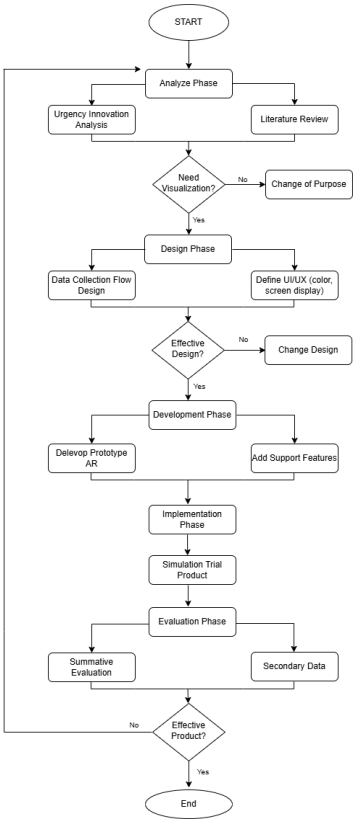
Pada tahap *Design*, dilakukan perancangan desain awal dari AR: PMLens, di sini peneliti akan menentukan apa saja yang akan dimuat dalam produk yang akan dibuat. Proses perancangannya dimulai dari pembuatan alur visualisasi partikel yang ada di udara hingga menampilkan bahaya partikulat yang tak kasat mata menjadi dapat dilihat dengan bantuan visualisasi AR, selanjutnya adalah menentukan bentuk media dari AR: PMLens yaitu, gambar, warna, tampilan layar dan lainnya.

Tahap *Development* atau pengembangan didasari oleh tahap desain yang sudah ditentukan sebelumnya, pada tahap ini peneliti mulai merealisasikan desain yang dibuat menjadi produk atau sebatas *prototype* yang siap diuji coba. AR: PMLens dikembangkan dengan menambahkan fitur-fitur tambahan yang mendukung visualisasi bahaya partikulat agar lebih optimal. Pada tahap ini juga dilakukan konsultasi terkait keefektifan produk untuk diimplementasikan di dunia nyata.

Selanjutnya, tahap *Implementation*, pada tahap ini implementasi dilakukan dengan uji coba produk, uji coba disesuaikan dengan produk yang dikembangkan. Akan tetapi, pada penelitian kali ini implementasi tidak dilakukan dengan skala penuh dan

akan digantikan dengan simulasi, yaitu bagaimana produk akan digunakan. Peneliti akan menyiapkan seluruh kebutuhan untuk memaparkan *prototype* produk dan menjelaskan bagaimana produk tersebut akan bekerja, mulai dari sumber data yang digunakan, alur visualisasi, dan hasil apa yang akan ditunjukkan.

Tahapan terakhir adalah *Evaluation*, tahap ini dilakukan untuk mengukur efektivitas media visualisasi yaitu produk AR: PMLens. Evaluasi umumnya dilakukan dalam dua bentuk, yaitu *formative* dan *summative*, evaluasi *formative* dilakukan secara berkala pada setiap tahapan dari model ADDIE, sedangkan evaluasi *summative* dilakukan setelah seluruh tahapan selesai dengan pengukuran kelayakan produk dari hasil uji coba dan validasi ahli juga studi kasus sebelumnya. Evaluasi penelitian untuk menilai efektivitas produk AR: PMLens ini dilakukan dengan menilai menggunakan data sekunder atau studi kasus dan studi literatur yang berkaitan.



Gambar 1. Alur Metodologi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analyze

Particulate Matter atau PM adalah campuran yang kompleks dari berbagai bahan kimia seperti partikel padat dan aerosol yang terdiri dari tetesan kecil cairan yang ditemukan di udara. Partikel sangat bervariasi dalam ukuran, bentuk, dan komposisi kimia, serta mengandung ion anorganik, senyawa logam, unsur karbon, senyawa organik dan senyawa dari kerak bumi. Partikel didefinisikan berdasarkan diameternya yang mana ini berguna pada saat pengaturan kualitas udara (California Air Resources Board, 2015). Beberapa partikel seperti debu, kotoran, jelaga, atau asap berukuran besar

atau cukup untuk dilihat dengan mata telanjang, partikel sejenis ini digolongkan dalam partikel diameter 10 mikron atau PM10, sedangkan beberapa partikel lainnya berukuran sangat kecil dan tidak terlihat dan hanya dapat dideteksi dengan menggunakan mikroskop elektron, digolongkan dalam partikulat halus yaitu partikel berdiameter 2,5 mikron atau PM2,5 (EPA, 2023).



Gambar 2. Perbandingan ukuran partikel PM (EPA, 2023)

PM10 dan PM2,5 umumnya berasal dari sumber emisi yang berbeda dengan komposisi kimia yang berbeda pula. Sebagian besar PM2,5 yang terdapat di luar ruangan dihasilkan dari emisi pembakaran, bensin, minyak, bahan bakar diesel, atau pembakaran kayu. PM10 berupa debu dari lokasi konstruksi, kebakaran hutan dan pembakaran sampah, sumber dari industri, debu, serbuk sari dan fragmen bakteri. Dari semua contoh sumber partikulat ini, sebagian besarnya terbentuk di atmosfer sebagai hasil dari reaksi kompleks bahan kimia yang secara tidak langsung terpancar dari sekitar lokasi kegiatan industri, jalanan, ataupun pembangkit listrik.

Melalui berbagai urgensi yang dirasakan, Pemerintah turut membantu dalam menangani masalah sanitasi udara atau bahaya partikulat dengan mengatur nilai ambang batas polusi udara dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia yang mengatur tentang PM melalui 1077/MENKES/PER/V/2011. Pada peraturan ini dinyatakan bahwa nilai ambang batas atau NAB dari PM2,5 sebesar 35 µg/m3 dalam 24 jam dan PM10 ≤70 µg/m3 dalam 24 jam. Adapun nilai ambang batas atau NAB yang diperbolehkan di luar ruangan untuk PM2.5 sebesar 65 µg/m3 dan PM10 sebesar 150 µg/m3.

Paparan dari PM ini berkaitan dengan berbagai efek kesehatan yang merugikan, seperti penurunan fungsi paru, permasalahan kardiovaskular, dan kematian dini. Menghirup PM2.5 dapat menyebabkan gejala seperti nyeri dada, batuk, mengi, dan kesulitan bernapas. Penelitian di Amerika juga menunjukkan adanya hubungan antara paparan PM dan kejadian diabetes pada orang dewasa dengan faktor risiko etnis dan obesitas tertentu (Kim et al., 2015). Selain itu, PM2,5 dapat dikatakan sebagai partikel yang paling berisiko memberikan dampak kesehatan kronis pada pekerja, selain karena ukurannya yang kecil dan bersifat tidak terlihat dengan mata telanjang, jangkauan pajanan PM2,5 juga masuk sampai ke alveolus dan ikut mengalir ke seluruh tubuh melalui darah.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, banyaknya bahaya partikulat yang tersebar di udara biasanya bersumber dari aktivitas pekerjaan, entah itu pembakaran, pengelasan, penggalian, pengecoran, dsb. Artinya, ancaman bahaya partikulat di lingkungan kerja tidak bisa dianggap sepele, karena sebagian besar sumber bahaya partikulat itu sendiri berasal dari produksi atau aktivitas kerja. Di Indonesia sendiri banyak pekerja yang belum sepenuhnya menyadari tentang realita bahaya partikulat yang mereka hadapi di tempat kerja dan dapat memberikan dampak kesehatan bagi mereka. Sudah menjadi tugas dari HSE untuk memastikan dan menjaga kesehatan dan keselamatan pekerja di tempat kerja, dan yang menjadi tantangan adalah bagaimana membuat pekerja sadar akan risiko yang ada di sekitar mereka. Penggunaan Alat Pelindung diri menjadi salah satu contoh kecil gambaran dari pekerja yang berperilaku selamat di tempat kerja, akan tetapi tingkat ketaatan pekerja dalam menggunakan APD itu masih rendah, padahal selain dapat melindungi dari bahaya fisik tapi juga dapat mencegah pekerja terkena risiko kesehatan jangka panjang akibat paparan di lingkungan kerja yang berbahaya (Babalola et al., 2023).

Walaupun kesadaran akan pentingnya berperilaku selamat seperti menggunakan APD semakin meningkat, masih banyak pekerja yang bersikap abai karena ketidaktahuan mereka tentang risiko yang ada. Hal ini menunjukkan bahwa pentingnya edukasi dan visualisasi bahaya khususnya bahaya partikulat agar dapat meningkatkan kesadaran pekerja akan wujud dari bahaya yang selama ini tidak terlihat dan tidak teraba oleh pekerja. Visualisasi bahaya ini juga dapat menjadi media intervensi bagi tim HSE dalam mempromosikan *safety behavior* di lingkungan kerja.

Design

Dalam pengembangan AR PMlens fokus pada pembuatan struktur dan tampilan awal dari aplikasi berbasis *Augmented Reality* (AR) untuk memvisualisasikan keberadaan partikulat di udara. Proses perancangan diawali dengan penyusunan alur visualisasi partikel dalam ruang tiga dimensi, agar keberadaan partikulat yang tidak kasat mata dapat divisualisasikan secara nyata melalui bantuan AR. Aplikasi dikembangkan dengan alur mulai dari data *collection* hingga *virtual representation*, yang mana akan dilanjutkan dengan *scan* QR untuk penggunaan aplikasinya.



Gambar 3. Alur pengembangan aplikasi

Beberapa desain UI/UX yang dirancang dalam AR PMlens mencakup:

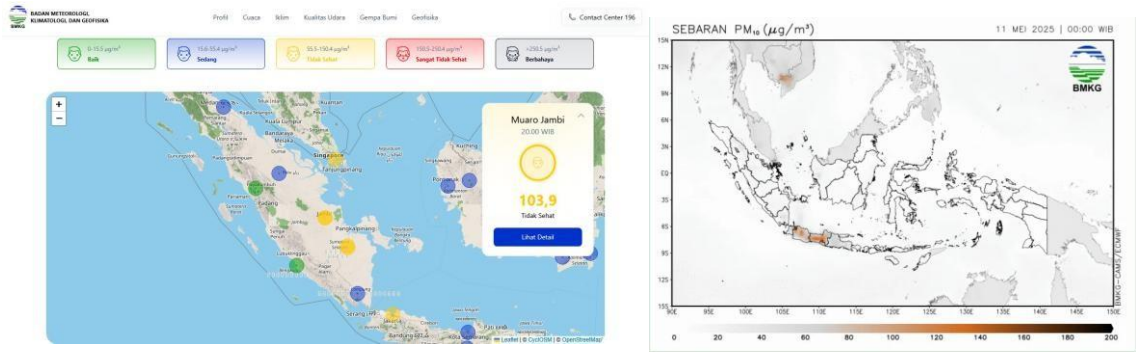
- **Visualisasi AR berbentuk gelembung (*bubbles*)** yang merepresentasikan konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10, di mana ukuran dan warna gelembung disesuaikan dengan tingkat konsentrasi. PM10 menggunakan warna oranye dan PM2,5 digambarkan dengan warna merah.
- **Fitur interaktif**, yang mana pengguna dapat mengetuk gelembung untuk

melihat informasi tambahan, seperti konsentrasi PM dalam µg/m³, dampak kesehatan, serta saran perlindungan diri.

- **Tampilan layar yang adaptif** dan ramah pengguna, yang mendukung akses dari berbagai perangkat *mobile*.

Data Collection

Pada pembuatan AR PMLens, ada beberapa data yang akan dibutuhkan untuk mendukung pengelolaan informasi mengenai PM yang tersebar di udara. Salah satu data yang akan kami gunakan dalam pembuatan AR PMLens ini adalah data *real time* dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), data ini menunjukkan sebaran partikulat yang ada di berbagai wilayah di Indonesia, khususnya sebaran PM10 (gambar kanan) dan PM2,5 (gambar kiri). Selanjutnya data tersebut akan diintegrasikan dalam AR PMLens untuk mengetahui sebaran PM10 dan PM2,5 yang ada di udara pada saat itu.



Gambar 4. Data *real time* BMKG sebaran PM2,5 (kiri) dan PM10 (kanan)

Data Processing

Penyediaan data *real time* dari BMKG telah memberikan peta tematik atau gambaran yang berkesinambungan di sebagian besar wilayah, yang berarti ada beberapa wilayah yang tidak terdeteksi yang artinya kurangnya data atau data yang tidak memadai untuk menilai sebaran PM di suatu lingkungan kerja. Mengatasi masalah ini, maka dilakukanlah proses analisis spasial, yang mana nilai konsentrasi setiap polutan yang terdeteksi oleh BMKG diinterpolasi melalui kegiatan *geoprocessing* pada platform GIS dengan metode IDW (*Inverse Distance Weighted*). Proses ini memungkinkan pengguna untuk menggunakan data dari titik-titik yang diketahui sebaran PM-nya untuk menentukan nilai statistik pada titik-titik yang tidak terbaca atau tidak memiliki informasi terkait sebaran PM (Sanità et al., 2024). Dengan ini pengguna dapat memperoleh informasi yang berkaitan dengan konsentrasi setiap polutan pada setiap wilayah, bahkan suatu lingkungan kerja secara kontinu dan tidak hanya pada titik tertentu yang hanya terbaca oleh BMKG, yang selanjutnya juga akan diintegrasikan ke dalam AR PMLens.

Development

Virtual Representation



Gambar 5. Visualisasi dengan AR PMlens

Hasil olahan data yang telah diproses menggunakan IDW kemudian direpresentasikan secara virtual melalui teknologi *Augmented Reality* (AR). AR PMlens dikembangkan menggunakan Unity's AR Foundation. AR PMlens digunakan dengan memindai kode QR menggunakan perangkat gawai, yang kemudian akan mengarahkan ke lingkungan virtual yang merepresentasikan kondisi udara aktual. Aplikasi ini memvisualisasikan konsentrasi PM10 dan PM2.5 berbasis interpolasi *Inverse Distance Weighted* (IDW), ditampilkan melalui pemindaian QR Code, serta dilengkapi informasi Nilai Ambang Batas (NAB), dampak kesehatan, dan rekomendasi pengendalian. Efektivitas aplikasi dianalisis menggunakan pendekatan ABC Model (*Antecedent–Behavior–Consequence*) terkait *safety behavior* pekerja. Dalam tampilan tersebut, pengguna dapat melihat "*bubbles*" atau gelembung visual yang merepresentasikan konsentrasi partikulat di lingkungan sekitar.

Implementation

Setelah melalui tahapan pengembangan prototipe dari AR PMlens selanjutnya adalah uji coba atau implementasi produk, akan tetapi karena keterbatasan waktu dan responden, maka pada penelitian kali ini tahap implementasi tidak dilaksanakan skala penuh. Maka dari itu dilakukanlah simulasi uji coba produk dengan memaparkan prototipe produk serta cara dan kegunaannya. Penampilan visual dari produk dibuat semirip mungkin dengan tampilan akhir agar pengguna dapat terbayang mengenai produk ini.

Untuk meningkatkan *safety behavior* pekerja, proses implementasi aplikasi AR PMlens ini dimulai dengan sosialisasi oleh HSE *officer* pada saat *safety talk* sebelum pekerjaan. HSE *officer* memberi arahan kepada pekerja untuk melakukan pemindaian *QR code* yang telah disediakan. *QR code* ini akan mengarah langsung ke aplikasi AR PMlens yang diakses melalui gawai masing-masing pekerja. Setelah aplikasi terbuka, pekerja mengarahkan kamera gawainya ke area lingkungan kerja untuk memindai kondisi aktual sekitar. Kemudian, pekerja akan melihat visualisasi partikel udara berbahaya berupa PM10 dan PM2,5 yang berada di lingkungan kerja tersebut dalam bentuk gelembung-gelembung atau "*bubbles*". Visualisasi ini memudahkan pekerjaan untuk melihat partikulat berbahaya yang tidak dapat dilihat dengan mata telanjang. Pekerja juga dapat menekan *bubbles* untuk mengetahui NAB, dampak kesehatan, dan rekomendasi pengendalian yang harus dilakukan ketika bekerja di ruangan tersebut. HSE *officer* menjelaskan lebih lanjut mengenai seberapa serius risiko kesehatan yang muncul akibat paparan tersebut, dan pentingnya penggunaan APD. Melalui proses tersebut, pekerja akan lebih *aware* akan keberadaan bahaya partikulat dan meningkatnya *safety behavior*, salah satunya dalam penggunaan APD. Penerapan APD yang lebih baik akan membantu meminimalkan risiko penyakit akibat kerja, mengurangi tingkat *absenteeism*, serta mendukung peningkatan produktivitas. Kondisi ini akan berkontribusi terhadap peningkatan profit perusahaan.

Evaluation

Evaluasi dari pengembangan produk ini dilakukan dengan melakukan *review* dari beberapa studi yang juga meneliti hal serupa, terkait apakah visualisasi dari bahaya partikulat dengan menggunakan inovasi teknologi AR ini efektif untuk meningkatkan *safety behavior* pekerja, dan membuat mereka sadar akan risiko bahaya partikulat bagi kesehatan mereka. Evaluasi dinilai dari pengembangan dan rekomendasi dari penelitian sebelumnya, melalui evaluasi ini peneliti bisa menggambarkan perkembangan teknologi AR dalam visualisasi partikulat dalam versi lebih baik, akan tetapi dari evaluasi ini juga peneliti bisa menilai validitas dan reliabilitas produk dan membandingkannya satu sama lain.

Pada penelitian yang dilakukan di Marche, Italia oleh Sanità et al., pada tahun 2024, pemanfaatan teknologi AR sangat bermanfaat dalam memvisualisasikan polutan di udara, sehingga meningkatkan kesadaran individu terhadap kondisi kualitas udara di sekitar mereka, yang mana hal ini membantu mereka dalam pengambilan keputusan yang lebih baik terkait perilaku sehari-hari, contohnya pada saat kadar debu sedang tinggi, menjadikan mereka yakin untuk menggunakan masker pada saat beraktivitas di luar ruangan. Untuk mendapatkan data *real-time*, teknologi AR ini terhubung ke Air *Quality* API, kemudian diuraikan menjadi visualisasi dalam aplikasi. Selanjutnya, dalam keterbatasan penelitian di Marche, Italian ini, peneliti menuliskan terkait perbaikan untuk pengembangan di masa mendatang, diantaranya menggunakan interpolasi data, yaitu penggunaan data dari beberapa sensor untuk membuat peta kualitas udara yang lebih *advanced*, yang kedua adalah menggambarkan perbandingan kondisi kualitas udara antar kota dengan menggunakan peta 2D, dan selanjutnya adalah perluasan informasi pada aplikasi terkait AQI, polutan, dan potensi risiko kesehatan dengan mengintegrasikannya ke dalam UI aplikasi web agar tetap ramah pengguna. Selanjutnya, peneliti juga berharap pada pengembangan selanjutnya teknologi ini dapat memasukkan visualisasi untuk polutan lain seperti CO2 dan 03, dan juga dapat menerapkan notifikasi *push* untuk memperingatkan pengguna tentang perubahan

signifikan dalam kualitas udara.

Selanjutnya, penelitian di Polandia terkait teknologi AR yang serupa dilakukan dan digelar pada acara publik di kota Myszków. Teknologi AR ini juga dibuat untuk memvisualisasikan polusi udara untuk meningkatkan kesadaran akan masalah kesehatan yang disebabkan oleh polusi udara. Peneliti mengembangkan produk tidak hanya dengan memvisualisasikan bahaya atau polusi tersebut, akan tetapi peneliti juga memvisualisasikan paru-paru sebagai model 3D yang dihasilkan oleh segmentasi trakea dan bronkus. Model disempurnakan dengan animasi sehingga menunjukkan bagaimana partikel-partikel tersebut mengalir dari udara sekitar melewati hidung ke trakea dan akhirnya menyelimuti paru-paru. Para pengunjung antusias dengan penelitian ini dan memberikan tanggapan setelah melakukan uji coba produk, salah satu testimoni dari teknologi AR pada penelitian ini mengatakan bahwa aplikasi ini membantu memperlihatkan kadar partikulat di udara yang selanjutnya menyadarkan mereka bagaimana kondisi udara sebenarnya walau dengan tanpa aplikasi itu udara tampak terlihat bersih.

Perbandingannya dengan AR PMlens ini yang mengembangkan aplikasi berdasarkan rekomendasi penelitian Sanità et al., data diambil dari data *real-time* milik BMKG, kemudian dilengkapi juga dengan teknik interpolasi agar seluruh lokasi di tempat kerja memiliki kisaran data terkait bahaya partikulat di tempat kerja, juga dilengkapi dengan informasi mengenai NAB dari masing-masing bahaya partikulat, risiko kesehatan yang mungkin dialami oleh pekerja jika terus terpapar oleh bahaya, dan rekomendasi APD yang sesuai. Evaluasi kedepannya berdasarkan penelitian ini adalah, dapat menambahkan variasi partikulat ke dalam AR PMlens, agar lebih banyak jenis bahaya partikulat yang tervisualisasikan pada pekerja. Selanjutnya, membuat fitur notifikasi peringatan bahaya di aplikasi AR PMlens saat kadar polutan meningkat, tidak seperti biasanya, dengan keterangan pekerja harus berhenti bekerja sejenak, atau menghindari lokasi dengan peningkatan polutan.

Safety Behavior

Efektivitas aplikasi dianalisis menggunakan pendekatan ABC Model (*Antecedent–Behavior–Consequence*) terkait *safety behavior* pekerja. Model ini digunakan untuk melakukan penilaian dan dasar teori dalam melakukan intervensi yang berkaitan dengan behaviorism. Model ini terdiri dari tiga komponen yang saling mempengaruhi, yaitu *Antecedent–Behavior–Consequence*. *Antecedent* ini yang akan memberikan stimulus pada diri pekerja sehingga muncul sebuah perilaku (*behavior*), baik itu perilaku selamat (*safe act*) maupun perilaku tidak selamat (*unsafe act*). Kemudian, *consequence* memiliki peran penting dalam menentukan apakah suatu perilaku akan diulang atau dihentikan oleh para pekerja.

Berdasarkan *literature review*, aplikasi AR PMlens dapat berperan sebagai pemicu atau *antecedent* dalam ABC Model (Novian et al., 2018). Masalah utamanya adalah para pekerja cenderung tidak peduli mengenai *particulate hazard* karena pekerja tidak dapat melihat bentuknya secara langsung sehingga merasa tidak ada bahaya yang mendekati mereka saat sedang bekerja. Maka dari itu, butuh sesuatu hal yang dapat meningkatkan persepsi pekerja terhadap tingginya risiko akibat *particulate hazard*. Dengan adanya visualisasi dari AR PMlens yang menampilkan bahaya tidak kasat mata menjadi tampilan visual, tentunya menjadi *trigger* bagi para pekerja akan keberadaan *particulate hazard*. Hal ini tentunya akan mengubah perilaku pekerja yang tadinya tidak

peduli menjadi *aware* terhadap bahaya tersebut karena sudah memiliki pemahaman mengenai konsekuensi kesehatan jangka panjang.

AR PMlens bisa dijadikan media intervensi oleh tim HSE yang ada di perusahaan untuk mengkomunikasikan risiko terkait *particulate hazard* secara lebih efektif dan menarik sehingga mampu mengubah pola pikir pekerja terkait *particulate hazard*. Proses visualisasi melalui AR PMlens diharapkan memicu transisi menuju *safety behavior*, seperti penggunaan APD yang konsisten, penghindaran zona bahaya, atau pelaporan kondisi berisiko.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan penelitian ini, AR PMlens terbukti menjadi solusi inovatif dalam mengatasi tantangan *particulate hazard* di lingkungan kerja melalui pendekatan Model ABC. Aplikasi ini berhasil berperan sebagai *antecedent* yang efektif dengan memvisualisasikan bahaya partikulat (PM2.5 dan PM10) yang selama ini tidak terlihat, sehingga meningkatkan kesadaran pekerja terhadap risiko kesehatan yang mengancam. Integrasi data *real-time* dari BMKG dan teknologi *Augmented Reality* (AR) memungkinkan representasi visual yang interaktif dan mudah dipahami, membantu pekerja membangun persepsi yang lebih akurat tentang bahaya di sekitarnya. Melalui pendekatan Model ABC, visualisasi ini tidak hanya memicu perubahan perilaku (*behavior*) menjadi lebih aman, seperti penggunaan APD atau menghindari zona berbahaya, tetapi juga mendorong tim HSE untuk mengembangkan sistem pemberian *consequence* (Model ABC) yang lebih terstruktur. Dengan demikian, AR PMlens tidak hanya menjadi alat komunikasi risiko, tetapi juga sarana transformasi budaya keselamatan di tempat kerja. Selain itu, aplikasi ini dapat menjadi rekomendasi bagi perusahaan dengan risiko tinggi terhadap pajanan *particulate hazard* sebagai media visual dalam upaya pembentukan dan peningkatan *safety behaviour* di lingkungan kerja. AR PMlens juga memiliki potensi implementasi yang luas di berbagai sektor, seperti konstruksi, pertambangan, industri manufaktur, transportasi, hingga pertanian, di mana *particulate hazard* menjadi risiko yang tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan *paper* ini, penulis mendapatkan banyak bimbingan, masukan, bantuan, dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu, melalui kesempatan ini, penulis menyampaikan penghargaan dan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan selama proses penulisan dan penyelesaian karya ini.

Secara khusus, penulis menyampaikan terima kasih yang sangat tulus kepada Bapak Abdul Kadir, S.K.M., M.K.K.K., selaku dosen pembimbing yang memberikan arahan, wawasan ilmiah, serta masukan selama seluruh proses penyusunan *paper* ini. Bapak Abdul Kadir tidak hanya memberikan bimbingan akademik, tetapi juga turut mendorong penulis untuk terus berpikir kritis, mempertajam analisis. Bimbingan beliau berperan penting dalam mendorong penulis untuk mengembangkan pola pikir kritis dan pendekatan analitis yang tajam.

Selain itu, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih yang mendalam kepada orang tua tercinta atas doa, dukungan moral, serta semangat yang tiada henti diberikan sepanjang proses penulisan berlangsung. Dukungan serta fasilitas yang disediakan dari orang tua menjadi sumber kekuatan dan motivasi yang sangat berarti, terutama dalam

menghadapi berbagai tantangan selama proses penelitian dan penulisan *paper* ini. Ketulusan doa dan dorongan moral dari orang tua telah memberikan keyakinan dan bagi penulis untuk menyelesaikan *paper* ini dengan sebaik-baiknya.

Tak lupa, penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Program Studi Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia, atas ilmu, pengalaman, dan pembelajaran yang telah diberikan selama masa studi. Materi dan wawasan yang diperoleh dari berbagai mata kuliah, diskusi akademik, serta kegiatan pembelajaran di lingkungan kampus sangat membantu penulis dalam memahami permasalahan yang diangkat dalam *paper* ini. Seluruh dukungan yang diberikan, baik berupa fasilitas akademik, akses terhadap literatur ilmiah, maupun lingkungan belajar yang kondusif, sangat berkontribusi dalam penyelesaian karya ini secara optimal.

OPEN ACCESS

DAFTAR PUSTAKA

Adiratna, Y., Astono, S., Fertiaz, M., Subhan, Opie Sugistria, C. A., Prayitno, H., Khair, R. I., Brando, A., & Putri, B. A. (2022). Profil Keselamatan dan Kesehatan Kerja Nasional Indonesia Tahun 2022. [*monograph on the Internet*] https://satudata.kemnaker.go.id/satudata-public/2022/10/files/publikasi/1675652225177_Profil%2520K3%2520Nasional%25202022.pdf

California Air Resources Board *[homapage on the Internet]*. (2015). *Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10)*. Ca.gov. https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health

EPA *[homapage on the Internet]*. (2023, July 11). *Particulate Matter* (PM) *Basics*. *United States Environmental Protection Agency.* https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics

Ferial, L., Fitria, L., & Silalahi, M. D. (2021). Konsentrasi *Particulate Matter* (Pm10) dan Gejala Pernapasan yang Dialami Pekerja Pabrik Semen "X", Kota Cilegon-Banten. Jurnal Lingkungan dan Sumber daya Alam (Jurnalis), 4(1), 1–12. https://doi.org/10.47080/jls.v4i1.1210

Fitriani, A. and Nawawiwetu, E.D. (2017). *The Relationship Between Antecedent and Consequence Factors with Safety Behaviour in PT.X, Journal of Vocational Health Studies*, 1(2), p. 50. https://doi.org/10.20473/jvhs.v1.i2.2017.50-57

Grzegorz Pochwatko, Zbigniew Jędrzejewski, Wiesław Kopeć, Kinga Skorupska, Rafał Masłyk, Jaskulska, A. and Justyna Świdrak (2023). *Representation of Air Pollution in Augmented Reality: Tools for Population–Wide Behavioral Change. Lecture notes in networks and systems,* pp.150–158. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37649-8_15

Hutauruk, B. C., Martono, D. N., & Sodri, A. (2021). *Risk and Impact Control of PM2.5 and SO2 Exposure of Power Plant to Communities (A Case Study in the Steam Power Plant Babelan Bekasi).* Jurnal Kesehatan Lingkungan, 13(2), 121. https://doi.org/10.20473/jkl.v13i2.2021.121-131

Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). *A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environment International*, 74(0160-4120), 136–143. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005

Maulidy, M. M., & Ratnawati, I. (2023). *Theeffect of Work Safety Climate and Worksafety Knowledge on Work Safety Behavior with Work Safety Motivation as An Intervening Variable [serial on the Internet]. [cited 2025 May 10]; Indonesian Interdisciplinary Journal of Sharia Economics (IIJSE)*, 6(1). https://e-journal.uac.ac.id/index.php/iijse/article/view/2604/1195

Novian, S., Kurniawan, B., & Siswi Jayanti. (2018). Analisis Faktor yang Berhubungan dengan Safety Behavior pada Pekerja Bagian Line Produksi di PT Coca Cola Bottling Indonesia. Jurnal Kesehatan Masyarakat (Undip), 6(1), 607–615.

Qingsong, M., Xiao, R., Yang, W., Wang, X. and Kong, Y. (2025). *Global burden of pneumoconiosis attributable to occupational particulate matter, gasses, and fumes from 1990~2021 and forecasting the future trends: a population-based study. Frontiers in Public Health,* 12. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1494942

Richey, R. C., & Klein, J. D. (2007). *Design and Development Research. Lawrence*

Erlbaum Associates, Inc., Publisher

Sanità, M., Fratini, J., Muralikrishna, N., Pierdicca, R. and Malinverni, E.S. (2024). *Augmented Reality for Air Quality Monitoring: Case Study in the Marche Region (Italy). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* XLVIII-4-2024, pp.389–395. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlviii-4-2024-389-2024

Sartina, I., & Purnamawati, D. (2024). Evaluasi penggunaan APD dalam konteks kesehatan dan keselamatan kerja di industri konstruksi (Vol. 3). Arka Institute. *Available from*: https://doi.org/10.55904/florona.v3i2.1219

Syuhada, G., Akbar, A., Hardiawan, D., Pun, V., Darmawan, A., Heryati, S.H.A., Siregar, A.Y.M., Kusuma, R.R., Driejana, R., Ingole, V., Kass, D. and Mehta, S. (2023). *Impacts of Air Pollution on Health and Cost of Illness in Jakarta, Indonesia. International Journal of Environmental Research and Public Health, [online]* 20(4), p.2916. https://doi.org/10.3390/ijerph20042916

World Health Organization *[homepage on the Internet]. WHO/ILO: Almost 2 million people die from work-related causes each year. [update 2021 September 17; cited 2025 April 30]. Available at*: https://www.who.int/news/item/17-09-2021-who-ilo-almost-2-million-people-die-from-work-related-causes-each-year