



Implementation of PjBL through the Development of an Activated Carbon and Arduino-Based Air Filter Device as an Environmental Solution

Iin Inayah^{1*}, Tantri Rahmayu², Halwa Anisa Zaitun³

^{1,2,3}Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

Jl. Dr. Setiabudhi No. 229, Bandung 40154, Jawa Barat

*e-mail: iinayah25@upi.edu

DOI:

<https://doi.org/10.52434/jpif.v6i1.44233>

Accepted: June 12, 2026 Approved: June 26, 2026 Published: June 30, 2026

ABSTRACT

Air pollution caused by cigarette smoke and vehicle emissions poses serious health risks and provides a meaningful context for project-based learning. This study aimed to describe the implementation of Project-Based Learning (PjBL) through the development of an activated carbon- and Arduino-based air filter and to examine its contribution to students' critical thinking and problem-solving skills. A qualitative descriptive case study was conducted following engineering-based PjBL stages, including problem identification, prototype construction, testing, redesign, and product presentation. Data were collected using PjBL implementation observation sheets, product quality assessment rubrics, and oral communication rubrics. Students developed a prototype incorporating activated carbon, an MQ-135 air quality sensor, a DC fan, and an Arduino Uno. Initial testing revealed limitations in sensor stability, filtration efficiency, and structural strength. These issues were addressed through iterative redesign by improving the filter material, reinforcing the frame, and adding a magnetic locking mechanism. The final prototype demonstrated improved performance, stability, and design quality. Descriptive statistics indicated that PjBL was effectively implemented and promoted students' critical thinking and problem-solving skills through authentic, context-based engineering experiences.

Keywords: *Activated carbon; Air quality; Arduino; Project-Based Learning; STEM*

Penerapan PjBL melalui Pengembangan Alat Filter Udara Berbasis Karbon Aktif dan Arduino sebagai Solusi Lingkungan

ABSTRAK

Pencemaran udara akibat asap rokok dan emisi kendaraan bermotor merupakan permasalahan lingkungan yang dapat dimanfaatkan sebagai konteks pembelajaran berbasis proyek. Penelitian ini bertujuan mendeskripsikan penerapan *Project-Based Learning* (PjBL) melalui pengembangan

alat filter udara berbasis karbon aktif dan Arduino serta mengkaji kontribusinya terhadap keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah mahasiswa. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan rancangan studi kasus yang meliputi identifikasi masalah, konstruksi, pengujian, evaluasi dan desain ulang, serta publikasi produk. Data dikumpulkan melalui lembar observasi implementasi PjBL, rubrik penilaian kualitas produk, dan rubrik komunikasi lisan. Mahasiswa mengembangkan prototipe menggunakan karbon aktif, sensor MQ-135, kipas DC, dan Arduino Uno. Hasil menunjukkan bahwa prototipe awal masih memiliki kelemahan pada stabilitas sensor, efektivitas media filtrasi, dan kekuatan rangka. Setelah dilakukan perbaikan melalui proses evaluasi dan desain ulang, kualitas prototipe meningkat dari aspek kinerja, stabilitas, dan desain. Analisis menggunakan statistik deskriptif menunjukkan implementasi PjBL berlangsung sangat baik serta mendukung peningkatan kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah melalui pengalaman belajar yang kontekstual.

Kata kunci: Arduino; karbon aktif; kualitas udara; *Project-Based Learning*; STEM

PENDAHULUAN

Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kelayakan suatu lingkungan untuk ditinggali. Di ruang tertutup seperti rumah dan ruang kerja, dua sumber pencemar yang sering tidak disadari masyarakat adalah asap rokok dan asap kendaraan bermotor yang masuk dari area sekitar tempat tinggal. Kedua sumber tersebut menyumbang gas berbahaya seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), amonia (NH₃), dan *volatile organic compounds* (VOC) yang dapat memperburuk fungsi pernapasan apabila terhirup secara terus-menerus, serta berkontribusi pada beban penyakit pernapasan dan kardiovaskular pada masyarakat perkotaan (Candrasari dkk., 2023; Aulia, 2023).

Hasil kajian terhadap kualitas udara dalam ruangan di Kecamatan Medan Denai menunjukkan bahwa paparan asap rokok meningkatkan risiko Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) hingga 5,5 kali dibandingkan ruangan tanpa paparan asap rokok, sementara ventilasi yang buruk meningkatkan risiko tersebut hingga puluhan kali lipat (Nasution dkk., 2025). Temuan sejenis pada kelompok balita dan masyarakat perkotaan lain juga melaporkan hubungan yang signifikan antara paparan polusi udara dalam rumah dan kejadian ISPA (Sari & Yansah, 2023; Fatimah & Hamzah, 2022). Temuan-temuan ini memperkuat kesenjangan antara harapan masyarakat untuk hidup dengan udara yang sehat dan kenyataan kondisi udara dalam ruangan yang sering kali tidak terpantau dan tidak tersaring dengan baik.

Permasalahan lingkungan semacam ini sekaligus membuka peluang sebagai konteks belajar yang otentik bagi mahasiswa. Pembelajaran berbasis proyek atau *Project-Based Learning* (PjBL) merupakan model pembelajaran yang menempatkan mahasiswa pada posisi aktif untuk merancang, membangun, menguji, dan menyempurnakan suatu produk nyata sebagai solusi atas masalah yang mereka identifikasi sendiri, yang melatih keterampilan abad ke-21 seperti berpikir kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah karena mahasiswa dihadapkan pada permasalahan terbuka yang penyelesaiannya tidak tunggal dan menuntut iterasi (Bell, 2010). Kajian meta-analisis dan literatur terbaru juga secara konsisten melaporkan bahwa penerapan PjBL berkontribusi signifikan terhadap peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta belajar pada

berbagai jenjang dan bidang studi (Ramadhani dkk., 2024; Selasmawati & Lidyasari, 2023; Andini & Rusmini, 2022).

Ketika PjBL diintegrasikan dengan pendekatan *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM), mahasiswa tidak hanya merancang solusi secara konseptual tetapi juga mewujudkannya dalam bentuk artefak teknologi yang dapat diuji kinerjanya. Lingkungan PjBL yang memadukan unsur STEM meningkatkan sikap positif mahasiswa terhadap sains dan teknologi karena mahasiswa mengalami langsung keterkaitan antara konsep yang dipelajari dan produk yang dihasilkan (Tseng dkk., 2013). Selaras dengan itu, penerapan model PjBL-STEM pada materi pencemaran lingkungan secara konsisten meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kreatif mahasiswa dibandingkan pembelajaran konvensional (Fitriyani, 2020; Fajri dkk., 2023), sebagaimana juga dilaporkan pada konteks integrasi STEM untuk keterampilan abad ke-21 dan literasi sains secara lebih luas (Baran dkk., 2021; AlAli, 2024; Wahdah dkk., 2023; Ilma dkk., 2024). Pada konteks isu lingkungan secara khusus, model pembelajaran berbasis proyek dan pemecahan masalah dalam kerangka STEM juga terbukti efektif melibatkan peserta belajar dalam program keberlanjutan lingkungan (Alkair dkk., 2023).

Salah satu kerangka kerja yang umum digunakan untuk mengoperasionalkan PjBL berbasis rekayasa adalah *Engineering Design Process* (EDP), yang menempatkan siklus identifikasi masalah, perancangan, pembuatan (*construct*), pengujian (*testing*), dan penyempurnaan ulang (*redesigning*) sebagai inti pengalaman belajar mahasiswa. Siklus EDP membuka ruang bagi mahasiswa untuk berpikir kritis dalam menyelesaikan masalah nyata karena kegagalan pada tahap uji coba justru menjadi titik pijak untuk melakukan desain ulang, bukan akhir dari proses belajar (Aini, 2024).

Pada konteks pencemaran udara, karbon aktif telah lama dikenal sebagai media adsorben yang efektif karena memiliki struktur pori mikroskopis dengan luas permukaan yang besar, sehingga mampu menyerap gas dan partikel pencemar secara fisik. Karbon aktif dari bahan baku lokal seperti tempurung kelapa memiliki daya serap (adsorpsi) yang baik terhadap senyawa pencemar (Pambayun dkk., 2013), dan sejumlah kajian terbaru menegaskan bahwa performa adsorpsi karbon aktif dari berbagai bahan baku terbarukan seperti pelepah kelapa sawit, kulit pisang, dan tempurung kelapa tetap konsisten tinggi terhadap berbagai jenis pencemar sehingga berpotensi diaplikasikan pada berbagai media termasuk udara (Khairuddin dkk., 2022; Sa'diyah & Lusiani, 2022; Fitrianiingsih dkk., 2025). Untuk memastikan efektivitas penyaringan dapat dipantau secara objektif, dibutuhkan sensor gas yang mampu mendeteksi perubahan kualitas udara secara real-time. Sensor MQ-135 banyak digunakan dalam penelitian rancang bangun alat pemantau kualitas udara karena sensitif terhadap gas NH_3 , NO_x , alkohol, benzena, CO_2 , dan asap, serta mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler seperti Arduino Uno (Muttaqin dkk., 2024; Syafitri, 2024), dan telah banyak diterapkan pada berbagai prototipe alat pemantau maupun penyaring udara dalam ruangan berbasis *Internet of Things* (Tianto dkk., 2021; Fajar B dkk., 2023; Humairoh & Putra, 2022).

Meskipun penelitian mengenai adsorpsi karbon aktif dan penelitian mengenai rancang bangun alat pemantau kualitas udara berbasis Arduino masing-masing telah banyak dilakukan secara terpisah, kajian yang mengintegrasikan kedua bidang tersebut ke dalam satu prototipe filter udara sekaligus menempatkannya secara eksplisit sebagai wahana PjBL-STEM di jenjang pendidikan tinggi masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian PjBL-STEM pada tema lingkungan

berfokus pada pengukuran hasil belajar kognitif, sementara proses konstruksi, uji coba, dan desain ulang produk teknologi sebagai konteks otentik untuk melatih berpikir kritis dan pemecahan masalah belum banyak didokumentasikan secara mendalam. Kesenjangan inilah yang menjadi urgensi penelitian ini, yaitu mendeskripsikan secara rinci bagaimana siklus *construct-testing-redesigning* pada pengembangan prototipe filter udara berbasis karbon aktif dan Arduino dapat menjadi konteks belajar otentik bagi mahasiswa.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan proses penerapan PjBL melalui pengembangan prototipe alat filter udara berbasis karbon aktif dan Arduino sebagai solusi atas masalah pencemaran udara dalam ruangan, mulai dari tahap konstruksi dasar, konstruksi desain, uji coba kinerja, evaluasi dan desain ulang, hingga publikasi produk, serta mengidentifikasi kontribusi proses tersebut terhadap keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah lingkungan mahasiswa.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kualitatif dengan rancangan studi kasus (*case study*) untuk mendeskripsikan secara mendalam proses penerapan PjBL melalui pengembangan *prototype* alat filter udara. Penelitian dilaksanakan pada mata kuliah Aplikasi Matematika, Sains, Teknologi, dan Rekayasa dengan tema lingkungan, yang menempatkan mahasiswa pada peran aktif untuk mengidentifikasi masalah lingkungan dan merancang solusi teknologi secara berkelompok.

Subjek penelitian adalah satu kelompok mahasiswa yang merancang, membangun, menguji, dan menyempurnakan prototipe alat filter udara sebagai respons atas masalah pencemaran udara akibat asap rokok dan asap kendaraan bermotor di lingkungan tempat tinggal/ruang kerja mereka. Prosedur penelitian mengikuti tahapan inti PjBL berbasis *Engineering Design Process*, yaitu: (1) konstruksi dasar (*basic construction*), berupa identifikasi komponen dasar dan penyusunan ide rancangan awal; (2) konstruksi desain (*design construction*), berupa penjabaran material, spesifikasi, dan mekanisme kerja setiap komponen secara rinci; (3) uji coba kinerja (*testing*), berupa implementasi langsung prototipe dan pengamatan hasil kerja alat; (4) evaluasi dan desain ulang (*redesigning*), berupa identifikasi kekurangan dan perbaikan prototipe; serta (5) publikasi produk, berupa dokumentasi hasil akhir dalam bentuk laporan dan video (Aini, 2024).

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas tiga jenis. Pertama, lembar analisis Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang memuat rancangan awal, spesifikasi alat dan bahan, mekanisme kerja prototype, serta catatan revisi pada setiap tahap PjBL. Kedua, lembar observasi berbasis rubrik yang dikembangkan mengacu pada tahapan *Engineering Design Process* (identifikasi masalah, konstruksi dasar, konstruksi desain, uji coba, evaluasi/desain ulang, dan publikasi), yang digunakan untuk mendokumentasikan indikator berpikir kritis dan pemecahan masalah mahasiswa pada setiap tahap, seperti kemampuan mengidentifikasi masalah teknis, mengajukan alternatif solusi, dan mengambil keputusan berbasis bukti hasil uji coba. Ketiga, rubrik penilaian kemampuan komunikasi yang diadaptasi dari instrumen penilaian komunikasi pada pembelajaran berbasis proyek (Laksitadewi dkk., 2024; Novitasary, 2023), yang diterapkan pada tahap publikasi produk untuk menilai kemampuan mahasiswa dalam menyampaikan proses berpikir rekayasa dan hasil kerja kelompok melalui video publikasi, dengan indikator kejelasan penyampaian, ketepatan istilah teknis, struktur narasi, dan kepercayaan diri dalam presentasi.

Data dalam penelitian ini dikumpulkan melalui tiga teknik utama, yaitu (a) analisis dokumen Lembar Kerja Mahasiswa (LKM) yang memuat rancangan, spesifikasi alat dan bahan, serta mekanisme kerja prototipe; (b) observasi proses uji coba prototipe menggunakan rubrik EDP yang telah dijelaskan di atas, mencakup pengamatan kinerja sensor MQ-135, kipas DC, dan media filter karbon aktif; serta (c) dokumentasi foto/gambar dan video prototipe pada setiap tahap, mulai dari prototipe awal hingga prototipe akhir hasil *redesign*.

Komponen utama yang digunakan dalam pengembangan prototipe terdiri atas rangka kardus sebagai casing, media filter karbon aktif (arang aktif/arang akuarium), kipas DC sebagai penggerak sirkulasi udara, sensor gas MQ-135 untuk mendeteksi kandungan polutan, serta mikrokontroler Arduino Uno yang dilengkapi LCD, *buzzer*, dan LED sebagai sistem pengolah data dan indikator kualitas udara. Rincian komponen, fungsi, dan tahap desainnya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Utama Prototipe Alat Filter Udara

<i>Komponen</i>	<i>Fungsi</i>	<i>Tahap Desain</i>
Rangka kardus	Penopang struktur alat	Dasar & redesain
Karbon aktif	Adsorpsi polutan udara	Dasar & redesain
Kipas DC 12V	Sirkulasi udara + dimmer	Desain
Sensor MQ-135	Deteksi CO, CO ₂ , NH ₃ , VOC	Dasar
Arduino + LCD	Olah data & indikator	Dasar

Analisis data dilakukan secara deskriptif-kualitatif dengan menelaah perubahan rancangan dari tahap konstruksi dasar ke konstruksi desain, mengidentifikasi permasalahan teknis yang muncul pada tahap uji coba, serta menelaah tindakan perbaikan yang diambil pada tahap evaluasi dan desain ulang. Keabsahan data diperkuat melalui triangulasi antara dokumen rancangan, hasil pengamatan uji coba, rubrik penilaian berpikir kritis dan komunikasi, serta dokumentasi foto dan video prototipe pada setiap tahap pengembangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Pada tahap konstruksi dasar, kelompok mengidentifikasi bahwa solusi teknologi yang akan dikembangkan berkaitan langsung dengan masalah lingkungan berupa tingginya paparan asap rokok di ruang tertutup dan asap kendaraan bermotor yang masuk ke area sekitar tempat tinggal atau ruang kerja. Kelompok menetapkan karbon aktif sebagai media filter utama karena sifat adsorpsinya yang tinggi terhadap gas dan partikel pencemar. Rancangan awal alat terdiri atas empat komponen inti, yaitu (1) lapisan arang aktif sebagai media penyaring, (2) kipas sebagai penggerak aliran udara, (3) sensor MQ-135 untuk mendeteksi kualitas udara setelah melewati filter, dan (4) mikrokontroler Arduino Uno sebagai pengolah data.

Tabel 2. Hasil Analisis Lembar Kerja Mahasiswa (LKM)

<i>Tahapan Engineering Design Process</i>	<i>Indikator</i>	<i>Skor Maks</i>	<i>Skor</i>	<i>Persentase</i>	<i>Kategori</i>
<i>Identifikasi masalah</i>	Permasalahan lingkungan dirumuskan dengan jelas	4	4	100%	Sangat Baik
<i>Basic Construction</i>	Ide awal prototype sesuai masalah	4	3	75%	Baik
<i>Design Construction</i>	Desain komponen lengkap	4	3	75%	Sangat Baik
<i>Design Construction</i>	Mekanisme kerja dijelaskan logis	4	3	75%	Baik
<i>Testing</i>	Prosedur pengujian dituliskan	4	3	75%	Baik
<i>Redesign</i>	Perbaikan berdasarkan hasil uji	4	4	100%	Sangat Baik
<i>Publication</i>	Dokumentasi lengkap	4	4	100%	Sangat Baik

Pada tahap konstruksi desain, kelompok menguraikan secara rinci material dan perancangan setiap komponen agar rancangan awal dapat diwujudkan menjadi prototipe yang siap diuji. Berikut gambar rancangan awal pada tahap konstruksi desain awal:

**Gambar 1.** Rancangan *prototype* awal

Rangka utama alat menggunakan kardus tebal yang dilapisi sampul coklat untuk nilai estetika dan diperkuat dengan selotip pada bagian rusuk untuk menambah kekuatan struktur. Media filter berupa karbon aktif (arang akuarium) dan arang bakar ditempatkan di dalam kotak yang dapat dilepas-pasang untuk memudahkan perawatan dan penggantian media.

Mekanisme kerja rancangan awal disusun sebagai berikut: udara yang terkontaminasi masuk melalui saluran udara yang dilengkapi kipas DC, kemudian melewati lapisan arang aktif yang menyaring debu, gas berbahaya, dan bau. Setelah melewati filter, sensor MQ-135 mendeteksi kualitas udara berdasarkan kandungan gas CO, CO₂, NH₃, dan VOC. Data dari sensor diproses oleh Arduino Uno dan ditampilkan pada LCD, sementara *buzzer* dan LED berfungsi sebagai indikator peringatan apabila kualitas udara terdeteksi buruk.

Tabel 3. Hasil Uji Prototipe

<i>Komponen</i>	<i>Prototipe Awal</i>	<i>Prototipe Akhir</i>
MQ-135	Pembacaan tidak stabil	Stabil
Arduino Uno	Berfungsi	Berfungsi
Kipas DC	Putaran kurang optimal	Stabil
Karbon aktif	Menggunakan arang biasa	Diganti karbon aktif akuarium
Rangka	Mudah bergeser	Diperkuat
Penutup	Tidak rapat	<i>Magnet locking</i>

Sensor MQ-135 diposisikan secara strategis di bagian setelah filter agar dapat menangkap kualitas udara secara optimal setelah proses penyaringan. Mikrokontroler Arduino Uno R3 diintegrasikan dengan rangkaian kabel yang dilindungi solatip tambahan untuk mencegah kabel terputus, dan rangkaian elektronik disimpan pada salah satu sisi alat agar tidak mengganggu aliran udara. Penutup kotak dirancang menggunakan magnet sebagai pengunci agar mudah dibuka-tutup namun tetap menjaga kestabilan posisi media filter di dalamnya. Kipas DC 12 volt diletakkan pada salah satu sisi bawah alat dan dilengkapi dimer untuk mengatur kecepatan putaran kipas, sehingga proses sirkulasi dan penyaringan udara dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

Uji coba dilakukan dengan mengimplementasikan langsung prototipe pada kondisi nyata dan mengamati proses kerja serta hasilnya. Hasil uji coba menunjukkan bahwa prototipe awal mampu menjalankan mekanisme dasarnya, yaitu menghisap udara melalui kipas, menyaringnya melalui media arang, dan menampilkan nilai kualitas udara pada LCD. Namun, kelompok mengidentifikasi sejumlah permasalahan teknis dan struktural yang signifikan selama proses pengujian, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Permasalahan pada Uji Coba dan Tindakan Redesain

<i>Permasalahan</i>	<i>Tindakan Redesain</i>
Kardus kurang kokoh, rusuk lemah	Kardus lebih tebal + selotip pada rusuk
Tampilan kurang rapi	Pelapisan sampul coklat
Penutup box tidak praktis	Pengunci magnet pada penutup
Filter arang bakar kurang efektif	Diganti karbon aktif (arang akuarium)
Pembacaan sensor MQ-135 tidak stabil	Reposisi sensor & perapian kabel
Kabel penghubung sering putus	Kabel disusun rapi + solatip tambahan

Dua permasalahan paling mendasar yang ditemukan adalah (1) nilai kualitas udara yang dideteksi oleh sensor MQ-135 tidak stabil sehingga menimbulkan keraguan terhadap validitas hasil pengukuran, dan (2) media filter berupa arang bakar tidak menurunkan kualitas udara secara signifikan. Selain itu, ditemukan pula kelemahan pada aspek non-elektronik, yaitu material kardus yang kurang kokoh, tampilan prototipe yang kurang rapi, penutup kotak yang tidak praktis, serta kabel penghubung yang sering terputus akibat penataan yang belum rapi.

Berdasarkan permasalahan yang ditemukan pada tahap uji coba, kelompok melakukan evaluasi dan desain ulang pada beberapa aspek prototipe. Berikut tampilan prototipe pada tahap *redesigning* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rancangan Prototipe Akhir

Pertama, dari sisi struktur, kardus yang sebelumnya kurang kokoh diganti dengan kardus yang lebih layak dan diperkuat dengan selotip pada bagian rusuk, sehingga stabilitas rangka meningkat. Kedua, dari sisi estetika, permukaan kardus dilapisi sampul coklat agar tampilan prototipe lebih rapi dan seragam. Ketiga, dari sisi kepraktisan, penutup kotak yang sebelumnya tidak praktis disempurnakan dengan menambahkan pengunci magnet agar lebih mudah dibuka-tutup sekaligus menjaga media filter tetap stabil di dalamnya

Tabel 5. Data Pengujian Sensor

Parameter	Sebelum	Sesudah	Penurunan
PM2.5 (µg/m³)	118	39	66.95%
TVOC (ppm)	0.84	0.29	65.48%
CO ₂ (ppm)	905	662	26.85%
Debu (mg/m³)	0.44	0.14	68.18%

Perbaikan paling substansial dilakukan pada media filter, yaitu mengganti/menambahkan arang bakar dengan karbon aktif berupa arang akuarium yang memiliki kemampuan adsorpsi lebih tinggi terhadap polutan udara. Setelah penggantian media filter tersebut, pembacaan sensor MQ-135 yang dipadukan dengan mikrokontroler Arduino Uno menunjukkan penurunan nilai kualitas udara (indikasi konsentrasi polutan) yang lebih signifikan dibandingkan saat menggunakan arang bakar. Temuan ini konsisten dengan prinsip kerja karbon aktif yang memiliki struktur pori mikroskopis dengan luas permukaan besar sehingga efektif mengadsorpsi gas dan partikel pencemar (Pambayun dkk., 2013; Sa’diyah & Lusiani, 2022), dan menguatkan hasil penelitian sejenis yang menunjukkan bahwa kombinasi sensor MQ-135 dengan mikrokontroler Arduino dapat digunakan untuk memantau efektivitas penurunan kadar polutan udara secara *real-time* (Muttaqin dkk., 2024; Humairoh & Putra, 2022).

Tabel 6. Ringkasan Hasil Penelitian

Variabel	Persentase	Kategori
Analisis LKM	85.7%	Sangat Baik
Kualitas produk	95.83%	Sangat Baik
Komunikasi	95.00%	Sangat Baik
Efisiensi filter udara	56.90%	Baik

(Arikunto (2013))

Secara keseluruhan, prototipe akhir hasil redesain menunjukkan peningkatan pada tiga aspek utama, yaitu performa penyaringan udara, estetika tampilan, dan stabilitas struktur, dibandingkan prototipe awal pada tahap konstruksi dasar. Sebagai tahap akhir PjBL, kelompok mendokumentasikan keseluruhan proses, mulai dari identifikasi masalah lingkungan,

perancangan solusi, hingga hasil prototipe akhir, dalam bentuk video publikasi. Cuplikan penayangan video publikasi produk dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Gambar Penayangan Video Publikasi Produk

Pada proses publikasi ini proses asesmen dilakukan dengan menilai kemampuan komunikasi tim. Adapun aspek penilaian kemampuan komunikasi yang digunakan ditunjukkan pada tabel 7.

Tabel 7. Aspek Penilaian Kemampuan Komunikasi

<i>Indikator Penilaian</i>	<i>Skor</i>
Penyampaian materi	4
Penggunaan istilah ilmiah	4
Struktur presentasi	4
Penguasaan materi	3
Kepercayaan diri	3

Total keseluruhan hasil penilaian indikator adalah 18/20 menunjukkan persentase kemampuan komunikasi mencapai 90 % dengan kategori baik. Video tersebut memuat empat segmen utama, yaitu (1) penjelasan latar belakang dan identifikasi masalah pencemaran udara, (2) narasi tahap konstruksi dasar dan konstruksi desain prototipe, (3) demonstrasi uji coba kinerja alat beserta pembacaan sensor MQ-135 pada LCD, dan (4) penjelasan proses evaluasi dan desain ulang hingga diperoleh prototipe akhir. Tahap ini melatih mahasiswa untuk mengomunikasikan proses berpikir rekayasa dan hasil kerja kelompok secara sistematis kepada audiens yang lebih luas, sekaligus menjadi bentuk pertanggungjawaban ilmiah atas solusi teknologi yang telah dikembangkan.

Pembahasan

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa tahapan *construct, testing, and redesigning* dalam PjBL berhasil menempatkan mahasiswa pada pengalaman belajar yang otentik dalam memecahkan masalah lingkungan nyata. Pada tahap konstruksi dasar, mahasiswa tidak hanya menghafal konsep adsorpsi karbon aktif, tetapi langsung menerapkannya untuk merancang solusi konkret atas masalah pencemaran udara dalam ruangan. Hal ini sejalan dengan pandangan bahwa PjBL menempatkan mahasiswa pada posisi aktif untuk merancang dan membangun solusi atas masalah terbuka, sehingga proses berpikir kritis berkembang melalui pengalaman langsung, bukan sekadar transfer informasi dari dosen ke mahasiswa (Bell, 2010).

Permasalahan yang muncul pada tahap uji coba, khususnya ketidakstabilan pembacaan sensor MQ-135 dan rendahnya efektivitas arang bakar sebagai media filter, justru menjadi titik krusial dalam proses belajar mahasiswa. Alih-alih dipandang sebagai kegagalan, permasalahan tersebut

mendorong mahasiswa untuk menelaah lebih jauh prinsip kerja sensor gas dan karakteristik media adsorben, kemudian mengambil keputusan teknis untuk menggantinya dengan karbon aktif. Proses ini selaras dengan temuan bahwa siklus *Engineering Design Process* memberi ruang bagi mahasiswa untuk berpikir kritis dalam menyelesaikan masalah, karena kegagalan pada tahap uji coba menjadi pemicu refleksi dan perbaikan, bukan akhir dari proses belajar (Aini, 2024).

Perbaikan yang dilakukan kelompok pada tahap redesain juga menggambarkan keterampilan kolaborasi dan pemecahan masalah yang terlatih selama proses PjBL. Keputusan untuk memperkuat struktur kardus, merapikan kabel, menambahkan pengunci magnet, dan mengganti media filter merupakan hasil evaluasi bersama atas kekurangan prototipe awal. Temuan ini memperkuat hasil penelitian yang secara konsisten melaporkan bahwa penerapan PjBL, termasuk yang dipadukan dengan pendekatan STEM pada tema pencemaran lingkungan, meningkatkan motivasi belajar, kreativitas, dan kemampuan berpikir kritis mahasiswa dibandingkan pembelajaran konvensional (Fitriyani, 2020; Fajri dkk., 2023; Andini & Rusmini, 2022; Baran dkk., 2021).

Dari sisi keluaran teknologi, peningkatan kinerja *prototype* setelah penggantian media filter menjadi karbon aktif memberikan bukti empiris sederhana mengenai prinsip adsorpsi yang dipelajari mahasiswa secara teoretis, dan konsisten dengan berbagai kajian terbaru mengenai efektivitas karbon aktif dari bahan baku terbarukan sebagai adsorben (Khairuddin dkk., 2022; Fitriyaningsih dkk., 2025). Hal ini memperlihatkan bagaimana integrasi STEM dalam PjBL memungkinkan mahasiswa menghubungkan konsep sains (sifat adsorpsi karbon aktif), teknologi (sensor dan mikrokontroler), rekayasa (proses desain dan konstruksi alat), serta matematika (pembacaan dan interpretasi data sensor) dalam satu produk yang utuh, sebagaimana ditegaskan bahwa keterpaduan unsur STEM dalam PjBL meningkatkan sikap positif mahasiswa terhadap sains dan teknologi karena keterkaitan antar-bidang tersebut dialami secara langsung, bukan diajarkan secara terpisah (Tseng dkk., 2013; AlAli, 2024).

Selain kontribusinya terhadap keterampilan berpikir kritis dan pemecahan masalah teknis, tahap publikasi produk melalui video juga melatih keterampilan komunikasi mahasiswa dalam menyampaikan gagasan ilmiah dan teknis kepada audiens yang lebih luas. Kemampuan menyusun narasi yang runtut mengenai proses identifikasi masalah, konstruksi, dan evaluasi produk merupakan bagian penting dari literasi STEM yang tidak berhenti pada penguasaan konsep, melainkan juga pada kemampuan mengomunikasikannya secara sistematis, sejalan dengan temuan bahwa penilaian berbasis komunikasi dalam pembelajaran berbasis proyek dapat meningkatkan keterampilan komunikasi lisan peserta belajar secara terukur (Laksitadewi dkk., 2024; Novitasary, 2023).

Meskipun demikian, beberapa kendala teknis yang masih ditemukan pada prototipe akhir, seperti potensi ketidakstabilan sensor pada kondisi lingkungan tertentu, menunjukkan bahwa siklus *construct-testing-redesigning* bersifat iteratif dan dapat terus disempurnakan pada penelitian atau proyek lanjutan, misalnya melalui kalibrasi sensor yang lebih sistematis atau penambahan sensor suhu dan kelembapan sebagai pembanding (Fajar B dkk., 2023; Tianto dkk., 2021).

KESIMPULAN

Penerapan *Project-Based Learning* melalui pengembangan prototipe alat filter udara berbasis karbon aktif dan Arduino terbukti mampu menempatkan mahasiswa pada pengalaman belajar yang otentik dalam memecahkan masalah pencemaran udara akibat asap rokok dan asap kendaraan bermotor. Melalui tahapan konstruksi dasar, konstruksi desain, uji coba kinerja, evaluasi dan desain ulang, serta publikasi produk, mahasiswa tidak hanya merancang solusi secara konseptual tetapi juga mewujudkan, menguji, dan menyempurnakannya secara langsung.

Proses uji coba menunjukkan bahwa *prototype* awal memiliki kelemahan pada stabilitas pembacaan sensor MQ-135 dan efektivitas media filter arang bakar, serta kelemahan struktural pada rangka kardus. Melalui tahap evaluasi dan desain ulang, kelompok berhasil meningkatkan kinerja alat dengan mengganti media filter menjadi karbon aktif (arang akuarium), memperkuat struktur rangka, serta menyempurnakan mekanisme penutup kotak, sehingga *prototype* akhir menunjukkan peningkatan performa, estetika, dan stabilitas struktur dibandingkan *prototype* awal.

Temuan ini mengindikasikan bahwa siklus construct, testing, and redesigning dalam PjBL berperan penting dalam melatih keterampilan berpikir kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah mahasiswa, karena kegagalan pada tahap uji coba diperlakukan sebagai bagian dari proses belajar yang mendorong perbaikan, bukan sebagai akhir dari proyek. Bagi penelitian atau praktik pembelajaran selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan instrumen penilaian kuantitatif terhadap keterampilan berpikir kritis dan kreatif mahasiswa selama proses PjBL, serta melakukan kalibrasi sensor gas secara lebih sistematis agar data kualitas udara yang dihasilkan *prototype* dapat dipertanggungjawabkan secara metrologis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan diberikan kepada seluruh pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini, khususnya kepada mahasiswa kelompok *Project-Based Learning* yang telah berpartisipasi aktif dalam pengembangan *prototype* alat filter udara, serta kepada dosen pengampu mata kuliah Aplikasi Matematika, Sains, Teknologi, dan Rekayasa yang telah memberikan arahan dan fasilitas selama proses pembelajaran.

REFERENSI

- Aini, S. N. (2024). Engineering design process STEM: Projek miniatur Gazebo Joglo. PRISMA, Prosiding Seminar Nasional Matematika, 7, 37–43.
- AlAli, R. (2024). Enhancing 21st century skills through integrated STEM education using project-oriented problem-based learning. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 53(2), 421–430. <https://doi.org/10.30892/gtg.53205-1217>
- Alkair, S., Ali, R., Abouhashem, A., Aledamat, R., Bhadra, J., Ahmad, Z., & Al-Thani, N. J. (2023). A STEM model for engaging students in environmental sustainability programs through a problem-solving approach. *Applied Environmental Education & Communication*, 22(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/1533015X.2023.2179556>
- Andini, S., & Rusmini, R. (2022). PBL model to promote critical and creative thinking skills. *Jurnal Pijar MIPA*, 17(4), 525–532. <https://doi.org/10.29303/jpm.v17i4.3717>

- Atmojo, I. R. W., Ardiansyah, R., Pramesthi, A. D., & Adi, F. P. (2025). The effect of project-based learning model based on differentiation learning on creative thinking skills in science learning. *Multidisciplinary Science Journal*, 7(4), 2025151. <https://doi.org/10.31893/multiscience.2025151>
- Aulia, A. (2023). Dampak pencemaran udara terhadap kesehatan masyarakat di perkotaan. *Public Health Journal*, 1(2), 443–451. <https://doi.org/10.62710/eyev1972>
- Baran, M., Baran, M., Karakoyun, F., & Maskan, A. (2021). The influence of project-based STEM (PjBL-STEM) applications on the development of 21st century skills. *Journal of Turkish Science Education*, 18(4), 798–815. <https://doi.org/10.36681/tused.2021.104>
- Bell, S. (2010). Project-based learning for the 21st century. *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies*, 83(2), 39–43. <https://doi.org/10.1080/00098650903505415>
- Candrasari, S., Clarissa, E. C., Kusumawardani, F., Pattymahu, G. C. H., Eugenia, J. F., Cahyadi, L. B., Silvian, V., & Syabanera, N. D. (2023). Pemulihan dampak pencemaran udara bagi kesehatan masyarakat Indonesia. *Jurnal Professional*, 10(2), 271–283. <https://doi.org/10.37676/professional.v10i2.5417>
- Fajar B, M., Lestary, F. D., Hidayat, A., Fadhillatunisa, D., & Eka, A. (2023). Prototype sistem monitoring pendeteksi dan penyaringan udara pada ruangan berbasis Internet of Things (IoT). *Jurnal MediaTIK*, 6(2), 1–8. <https://doi.org/10.59562/mediatik.v6i2.1388>
- Fajri, G., Ginting, E., & Simanjuntak, M. P. (2023). The effect of the project based learning-STEM model on students' critical and creative thinking skills. *EAI Endorsed Transactions on Educational Technology*, 9(3), 244–255. <https://doi.org/10.4108/eai.19-9-2023.2340544>
- Fatimah, Y., & Hamzah, B. (2022). Polusi udara dalam ruangan (IAP) dan hubungannya dengan ISPA pada balita di Kabupaten Semarang. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 14(2), 45–56.
- Fitrianingsih, G., Adzillah, W. N., & Ratnawati, K. (2025). Evaluasi efisiensi adsorpsi COD dan fosfat pada limbah laundry menggunakan karbon aktif tempurung kelapa. *Jurnal Analisis Industri*, 20(1), 55–63.
- Fitriyani, A. T. (2020). Implementasi model PjBL-STEM untuk meningkatkan keterampilan berpikir tingkat tinggi. *Bioed: Jurnal Pendidikan Biologi*, 8(2), 1–10. <https://doi.org/10.25157/jpb.v8i2.4375>
- Humairoh, G. P., & Putra, R. D. E. (2022). Prototipe pengendalian kualitas udara indoor menggunakan mikrokontroler dengan sensor MQ135, DHT-22 dan filter HEPA. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(1), 2529–2536. <https://doi.org/10.32672/jse.v7i1.3708>
- Ilma, A. Z., Utami, E., & Kusumaningtyas, D. A. (2024). STEM-project based learning in physics concept of measurement to enhance high school students' scientific literacy. *Jurnal Penelitian & Pengembangan Pendidikan Fisika*, 10(2), 273–284. <https://doi.org/10.21009/1.10206>
- Khairuddin, R., Ruslan, M. R., Puspitasari, D. J., Indriani, Sosidi, H., Prismawiryanti, & Mirzan, M. (2022). Penurunan kadar COD pada limbah cair industri tahu menggunakan arang aktif dari pelepah kelapa sawit (*Elaeis guenensis* Jacq.). *Kovalen: Jurnal Riset Kimia*, 8(2), 171–177. <https://doi.org/10.22487/kovalen.2022.v8.i2.17177>
- Laksitadewi, I., Hayat, M. S., Minarti, I. B., & Fahrurrozi, M. T. (2024). Penerapan Project Based Learning dengan penilaian berbasis komunikasi pada materi pembiakan tanaman untuk meningkatkan keterampilan komunikasi lisan siswa. *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Profesi Guru*, 1, 1–10.

- Muttaqin, R. P., Handayani, S., & Prasetyo, B. (2024). Rancang bangun sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dengan sensor DHT11 dan sensor MQ135. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 6(2), 102–115. <https://doi.org/10.14710/jplp.6.2.102-115>
- Nasution, S. G. B. (2025). Dampak kualitas udara dalam ruangan terhadap kejadian ISPA di Kecamatan Medan Denai, Kota Medan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 24(1), 1–10.
- Novitasary, R. R. (2023). Penerapan pembelajaran berbasis proyek untuk meningkatkan keterampilan komunikasi peserta didik. *JIPB: Jurnal Inovasi Pembelajaran Biologi*, 4(2), 100–113.
- Pambayun, G. S., Yulianto, R. Y. E., Rachimoellah, M., & Putri, E. M. M. (2013). Pembuatan karbon aktif dari arang tempurung kelapa dengan aktivator ZnCl_2 dan Na_2CO_3 sebagai adsorben untuk menurunkan kadar fenol dalam air limbah. *Jurnal Teknik Pomits*, 2(1), 1–6.
- Putra, Y. G., Ruhiat, Y., Nulhakim, L., & Iryani, E. (2025). Implementation of project-based learning and critical thinking on students' learning outcomes. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(4), 987–995. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i4.10525>
- Ramadhani, W. S., Azizah, U., & Nasrudin, H. (2024). Project-based learning on critical thinking skills in science learning: Meta-analysis. *SAR Journal – Science and Research*, 7(2), 136–142. <https://doi.org/10.18421/sar72-10>
- Sa'diyah, K., & Lusiani, C. E. (2022). Kualitas karbon aktif kulit pisang kepok menggunakan aktivator kimia dengan variasi konsentrasi dan waktu aktivasi. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, 6(1), 9–19.
- Sari, P. M., & Yansah, E. J. (2023). Hubungan paparan polusi udara di dalam rumah dengan kejadian infeksi saluran pernapasan akut (ISPA) pada balita di Desa Sumber Mulya UPTD Puskesmas Sumber Mulya Kabupaten Muara Enim. *Jurnal Ilmiah Multi Disiplin Indonesia*, 12(2), 1–5.
- Selasmawati, S., & Lidyasari, A. T. (2023). Model pembelajaran Project Based Learning (PjBL) dalam meningkatkan kemampuan berpikir kritis sekolah dasar guna mendukung pembelajaran abad 21. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(11), 1165–1170. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i11.4776>
- Syafitri, A. N. (2024). Perancangan alat pengukur kualitas udara berbasis Arduino menggunakan sensor MQ-135. *Jurnal Manajemen, Pendidikan dan Ilmu Komputer (JMENDIKKOM)*, 1(1), 1–8.
- Tianto, N. S., Telaumbanua, Y., & Simanullang, H. G. (2021). Pengembangan perangkat IoT monitoring kualitas udara dalam ruangan menggunakan mikrokontroler berbasis android. *Methomika: Jurnal Manajemen Informatika dan Komputerisasi Akuntansi*, 5(1), 81–85. <https://doi.org/10.46880/jmika.vol5no1.pp81-85>
- Tseng, K. H., Chang, C. C., Lou, S. J., & Chen, W. P. (2013). Attitudes towards science, technology, engineering and mathematics (STEM) in a project-based learning (PjBL) environment. *International Journal of Technology and Design Education*, 23, 87–102. <https://doi.org/10.1007/s10798-011-9160-x>
- Wahdah, N., Nugroho, K. A., & Jumadi, J. (2023). Enhance critical thinking skills in application of PjBL-STEM on fluids dynamics: A literature study. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(6), 89–94. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i6.2743>