

## MODEL INDEKS TERPADU PENCEMARAN LINGKUNGAN UNTUK PENDIDIKAN TEKNIK MESIN

### INTEGRATED ENVIRONMENTAL POLLUTION INDEX MODEL FOR MECHANICAL ENGINEERING EDUCATION

**Damianus Manesi<sup>1\*</sup>, Priyono<sup>2</sup> dan Yufitriani F. Littik<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup>Program Studi Pendidikan Teknik Mesin FKIP Undana

<sup>3</sup>Teknik Mesin, Institut Teknologi Alberth Foenay Kupang-NTT

e-mail: \*damianus.manesi@staf.undana.ac.id, priyono@staf.undana.ac.id dan yufitriani@gmail.com

#### Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model indeks terpadu pencemaran lingkungan yang mengintegrasikan kualitas air, udara, dan tanah dalam satu kerangka evaluasi kuantitatif yang sederhana dan aplikatif. Studi dilakukan di bengkel Program Studi Pendidikan Teknik Mesin dengan karakteristik aktivitas berupa pengelasan, pengoperasian mesin, dan interaksi dengan lingkungan eksternal. Data diperoleh dari tiga titik sampling yang mewakili area aktivitas utama, kemudian dianalisis menggunakan metode normalisasi terhadap baku mutu dan perhitungan indeks berbasis rata-rata aritmatika. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai indeks kualitas lingkungan secara keseluruhan sebesar 1,24 yang dikategorikan sebagai tercemar ringan. Secara parsial, media udara memiliki nilai indeks tertinggi (1,89) dengan kategori tercemar sedang, sedangkan media air (0,95) dan tanah (0,88) berada dalam kondisi relatif baik. Temuan ini menunjukkan bahwa pencemaran lingkungan di bengkel didominasi oleh faktor udara akibat aktivitas pengelasan dalam ruang tertutup, emisi kendaraan, dan pengaruh lalu lintas. Model yang dikembangkan terbukti mampu menyederhanakan evaluasi multi-parameter menjadi indikator komposit yang mudah diinterpretasikan. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan metode evaluasi pencemaran lingkungan yang sederhana dan relevan untuk pendidikan vokasi teknik mesin

**Kata kunci:** *pencemaran lingkungan terpadu, indeks kualitas lingkungan, teknik mesin, evaluasi lingkungan*

#### Abstract

*This study develops an integrated environmental pollution index model that combines water, air, and soil quality into a unified, quantitative evaluation framework that is both simple and applicable. The study was conducted in a Mechanical Engineering Education workshop characterized by activities such as welding, engine operation, and interaction with external environmental factors, including traffic emissions. Data were obtained from three representative sampling points covering the main activity zones and were analyzed through normalization against environmental quality standards followed by index calculation using an arithmetic mean approach. The results indicate that the overall environmental quality index is 1.24, which falls into the lightly polluted category. Among the assessed media, air exhibits the highest index value (1.89), indicating moderate pollution, while water (0.95) and soil (0.88) remain in relatively good condition. These findings demonstrate that environmental degradation within the workshop is primarily driven by air pollution resulting from indoor welding processes, engine emissions, and continuous exposure to nearby traffic activities. The proposed model effectively transforms complex multi-parameter environmental data into a single composite indicator that is both interpretable and operationally practical. This study contributes to the advancement of simplified environmental assessment models and provides a relevant framework for integrating environmental awareness into mechanical engineering vocational education.*

**Keywords:** *integrated environmental pollution, environmental quality index, mechanical engineering education, environmental assessment*

## PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan merupakan isu global yang terus mengalami peningkatan seiring dengan berkembangnya aktivitas industri, transportasi, dan kegiatan teknis skala kecil, termasuk di lingkungan pendidikan vokasi. Aktivitas praktik di bengkel teknik mesin, seperti pengelasan, pengoperasian mesin pembakaran, serta penggunaan bahan kimia dan pelumas, berpotensi menghasilkan emisi udara, limbah cair, serta residu padat yang dapat mencemari lingkungan sekitar. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa pencemaran lingkungan tidak hanya terjadi pada skala industri besar, tetapi juga pada aktivitas skala menengah dan kecil yang bersifat rutin dan terakumulasi dalam jangka panjang (Zhang et al., 2021; Santoso et al., 2020).

Dalam beberapa dekade terakhir, berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengevaluasi kualitas lingkungan melalui penggunaan indeks kualitas, seperti Water Quality Index (WQI) dan Air Quality Index (AQI). Pendekatan ini memungkinkan penyederhanaan parameter lingkungan yang kompleks menjadi satu nilai indeks yang mudah diinterpretasikan (Hossain & Patra, 2020; Mukate et al., 2019). Selain itu, pengembangan model indeks juga telah diarahkan pada integrasi multi-parameter untuk meningkatkan akurasi dalam merepresentasikan kondisi lingkungan secara menyeluruh (Schuwirth, 2020). Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada satu media lingkungan secara terpisah, seperti air, udara, atau tanah, sehingga belum mampu menggambarkan kondisi pencemaran secara komprehensif.

Keterbatasan pendekatan parsial tersebut mendorong perlunya pengembangan model evaluasi yang bersifat terpadu. Beberapa penelitian telah mencoba mengembangkan model integratif, seperti pendekatan indeks pencemaran sungai berbasis multi-parameter (Gupta & Gupta, 2021) serta model evaluasi kualitas lingkungan berbasis data fusion (Huo et al., 2020). Selain itu, pendekatan lain seperti sediment quality triad dan pengembangannya juga menunjukkan pentingnya integrasi berbagai indikator dalam menilai kualitas lingkungan secara holistik (Fonseca et al., 2021). Meskipun demikian, model-model tersebut umumnya memiliki kompleksitas yang tinggi, membutuhkan data yang luas, serta kurang aplikatif untuk konteks pembelajaran di pendidikan vokasi.

Di sisi lain, validitas dan efektivitas penggunaan indeks lingkungan juga menjadi perhatian penting dalam berbagai studi. Indeks

yang tidak dirancang dengan baik berpotensi menghasilkan interpretasi yang bias terhadap kondisi lingkungan sebenarnya (Klik et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan model indeks yang tidak hanya akurat, tetapi juga sederhana, adaptif, dan mudah diterapkan dalam kondisi keterbatasan fasilitas, seperti pada lingkungan pendidikan teknik mesin.

Konteks pendidikan vokasi, khususnya pada program studi pendidikan teknik mesin, memiliki karakteristik unik yang membedakannya dari lingkungan industri maupun permukiman. Aktivitas praktik yang melibatkan proses pengelasan dalam ruang tertutup, pengujian mesin berbahan bakar, serta tingginya intensitas penggunaan ruang oleh mahasiswa berpotensi meningkatkan tingkat pencemaran udara dan kebisingan. Selain itu, keterbatasan sistem pengelolaan limbah, terutama pada saluran pembuangan air, dapat memicu terjadinya pencemaran meskipun dalam skala yang relatif kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa lingkungan bengkel pendidikan teknik mesin merupakan sistem yang kompleks dan memerlukan pendekatan evaluasi yang spesifik dan kontekstual.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat kesenjangan yang jelas antara kebutuhan akan model evaluasi pencemaran lingkungan yang terpadu dan aplikatif dengan ketersediaan metode yang ada saat ini. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model indeks terpadu pencemaran lingkungan yang mengintegrasikan parameter kualitas air, udara, dan tanah dalam satu kerangka evaluasi yang sederhana dan mudah diterapkan. Model yang dikembangkan diharapkan tidak hanya mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi pencemaran lingkungan, tetapi juga dapat digunakan sebagai alat pembelajaran yang efektif dalam pendidikan teknik mesin serta sebagai referensi untuk penelitian lanjutan di bidang pencemaran lingkungan.

## METODE PENELITIAN

### Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis pengembangan model (model development study) dengan tujuan merumuskan dan mengaplikasikan model indeks terpadu pencemaran lingkungan. Pendekatan ini mengintegrasikan pengukuran parameter kualitas lingkungan dari tiga media utama, yaitu air, udara, dan tanah, ke dalam satu nilai indeks komposit

yang merepresentasikan kondisi lingkungan secara menyeluruh.

Pendekatan berbasis indeks dipilih karena mampu menyederhanakan kompleksitas data multi-parameter menjadi informasi yang mudah diinterpretasikan tanpa menghilangkan makna ilmiahnya (Hossain & Patra, 2020; Mukate et al., 2019). Selain itu, pendekatan ini juga telah banyak digunakan dalam evaluasi kualitas lingkungan karena fleksibel dan adaptif terhadap berbagai kondisi lapangan (Schuwirth, 2020).

### Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilakukan di bengkel/laboratorium Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, yang memiliki karakteristik aktivitas seperti pengelasan, pengoperasian mesin pembakaran dalam, serta praktik perawatan kendaraan. Lingkungan bengkel berada di area terbuka yang berdekatan dengan jalan raya, sehingga dipengaruhi oleh aktivitas eksternal seperti lalu lintas kendaraan.

Objek penelitian meliputi:

1. kualitas air dari genangan limbah sesaat,
2. kualitas udara di area aktivitas bengkel,
3. kualitas tanah di sekitar lingkungan bengkel.

### Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan pada tiga titik sampling (S1, S2, S3) yang merepresentasikan:

1. area pengelasan (indoor),
2. area praktik mesin/kendaraan,
3. area terbuka dekat jalan raya.

Pendekatan multi titik ini digunakan untuk menangkap variasi spasial kondisi lingkungan serta meningkatkan representativitas data (Huo et al., 2020). Nilai parameter yang diperoleh kemudian dirata-ratakan untuk analisis lebih lanjut.

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data kondisi riil lapangan (*realistic dataset*) yang diukur berdasarkan karakteristik aktivitas bengkel dan referensi nilai umum kualitas lingkungan. Pendekatan ini lazim digunakan pada tahap pengembangan model untuk menguji konsistensi dan kelayakan metode pada pengukuran lapangan aktual (Klik et al., 2020).

### Parameter yang Diukur

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan relevansi terhadap aktivitas bengkel teknik mesin serta ketersediaan standar baku mutu lingkungan seperti terlihat pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Parameter Pengukuran

Kualitas Air	Kualitas Udara	Kualitas Tanah
<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH</li> <li>• Dissolved Oxygen (DO)</li> <li>• Total Dissolved Solids (TDS)</li> <li>• Chemical Oxygen Demand (COD)</li> <li>• Biological Oxygen Demand (BOD)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Particulate Matter (PM2.5 dan PM10)</li> <li>• Karbon monoksida (CO)</li> <li>• Nitrogen oksida (NOx)</li> <li>• Kebisingan (dB)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH tanah</li> <li>• Kandungan minyak/lemak</li> <li>• Logam berat (Pb)</li> </ul>
<p>Parameter ini umum digunakan dalam evaluasi kualitas air karena mampu merepresentasikan kondisi fisik, kimia, dan biologis (Mukate et al., 2019 ; Ratnaningsih et al., 2020)</p>	<p>Parameter ini dipilih karena berkaitan langsung dengan aktivitas pengelasan, pembakaran, dan lalu lintas (Zhang et al., 2021).</p>	<p>Parameter ini digunakan untuk mendeteksi kontaminasi akibat aktivitas mekanik dan penggunaan pelumas (Aravindh et al., 2020)</p>

### Formulasi Model Indeks Terpadu

#### a. Normalisasi Parameter

Setiap parameter lingkungan dinormalisasi terhadap nilai baku mutu menggunakan rasio:

$$S_i = \frac{C_i}{B_i} \dots (1)$$

di mana:

$S_i$  : skor parameter ke- $i$

$C_i$  : nilai hasil pengukuran

$B_i$  : nilai baku mutu

Untuk parameter dengan karakteristik “semakin besar semakin baik” (Misalnya DO), digunakan inversi:

$$S_i = \frac{B_i}{C_i} \dots (2)$$

Pendekatan normalisasi ini banyak digunakan dalam pengembangan indeks kualitas lingkungan karena sederhana dan efektif dalam membandingkan parameter yang berbeda satuan (Hossain & Patra, 2020).

#### b. Indeks Kualitas per Media

Nilai indeks untuk setiap media lingkungan dihitung menggunakan rata-rata aritmatika:

$$I_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \dots (3)$$

di mana:

$I_m$  : indeks media (air, udara, atau tanah)

$n$  : jumlah parameter

Pendekatan ini dipilih karena memberikan bobot yang seimbang terhadap setiap parameter dan banyak digunakan dalam model indeks kualitas lingkungan (Mukate et al., 2019).

### c. Indeks Terpadu Lingkungan

Indeks total dihitung dengan mengintegrasikan seluruh media:

$$I_{total} = \frac{I_{Air} + I_{udara} + I_{tanah} \dots}{3} \dots (4)$$

Pendekatan ini mengasumsikan bahwa ketiga media memiliki kontribusi yang seimbang terhadap kualitas lingkungan secara keseluruhan. Model ini merupakan bentuk penyederhanaan dari pendekatan integratif multi-media yang telah dikembangkan dalam berbagai studi sebelumnya (Schuwirth, 2020; Fonseca et al., 2021).

### Kriteria Klasifikasi Indeks

Nilai indeks yang diperoleh diklasifikasikan pada tabel 2 sebagai berikut:

Rentang Nilai	Kategori
< 1	Baik
1 – 2	Tercemar ringan
2 – 3	Tercemar sedang
> 3	Tercemar berat

Klasifikasi ini diadaptasi dari pendekatan umum dalam indeks kualitas lingkungan yang digunakan untuk mempermudah interpretasi hasil (Hossain & Patra, 2020).

### Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Pengolahan data hasil pengukuran dan perhitungan nilai rata-rata
2. Normalisasi parameter terhadap baku mutu
3. Perhitungan indeks per media
4. Perhitungan indeks terpadu
5. Interpretasi hasil berdasarkan klasifikasi

Pendekatan ini memungkinkan evaluasi kondisi lingkungan secara kuantitatif sekaligus memberikan dasar untuk analisis komparatif antar media lingkungan.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengukuran Parameter Lingkungan

Pengukuran dilakukan pada tiga titik sampling (S1-S3) yang merepresentasikan area aktivitas utama bengkel. Nilai yang digunakan dalam analisis merupakan nilai rata-rata dari masing-masing parameter.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Kualitas Air

Parameter	S1	S2	S3	Rerata	Baku Mutu
pH	6.8	6.5	6.7	6.67	6–9
DO (mg/L)	5.8	5.2	5.5	5.5	≥ 6
TDS (mg/L)	420	480	450	450	500
COD (mg/L)	40	55	50	48.3	50
BOD (mg/L)	20	28	25	24.3	30

Secara umum, hasil pengukuran pada tabel 3 di atas, menunjukkan kualitas air masih berada di sekitar ambang baku mutu, namun terdapat indikasi penurunan kualitas terutama pada parameter DO yang berada di bawah standar serta COD yang mendekati batas maksimum. Hal ini menunjukkan adanya pencemaran ringan yang bersifat episodik akibat aktivitas penggunaan air di bengkel.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kualitas Udara

Parameter	S1	S2	S3	Rerata	Baku Mutu
PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )	65	72	68	68.3	35
PM10 (µg/m <sup>3</sup> )	130	145	138	137.7	50
CO (ppm)	10	12	11	11	8
NOx (ppb)	75	82	78	78.3	53
Kebisingan (dB)	82	85	83	83.3	70

Tabel 4 di atas memperlihatkan bahwa seluruh parameter kualitas udara melampaui baku mutu yang ditetapkan. Nilai PM2.5 dan PM10 yang tinggi mengindikasikan dominasi partikulat dari aktivitas pengelasan dan debu jalan raya. Konsentrasi CO dan NOx menunjukkan kontribusi signifikan dari emisi kendaraan dan mesin pembakaran, sedangkan tingkat kebisingan yang tinggi dipengaruhi oleh aktivitas praktik dan lalu lintas.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Kualitas Tanah

Parameter	S1	S2	S3	Rata-rata	Baku Mutu
pH	6.5	6.3	6.4	6.4	~7
Minyak (%)	0.6	0.8	0.7	0.7	1
Pb (mg/kg)	40	45	42	42.3	50

Hasil pengukuran pada tabel 5 di atas, terlihat bahwa kualitas tanah relatif masih dalam kondisi baik. Kandungan minyak dan logam berat masih berada di bawah ambang batas, yang menunjukkan bahwa sistem pengelolaan limbah padat dan penggunaan lantai beton mampu meminimalkan infiltrasi pencemar ke tanah.

### Hasil Normalisasi Parameter

Nilai parameter kemudian dinormalisasi menggunakan persamaan rasio terhadap baku mutu (Pers 1&2). Hasil normalisasi digunakan untuk menghitung indeks kualitas masing-masing media.

Tabel 6. Hasil Normalisasi Parameter (Si)

Air		Udara		Tanah	
Parameter	Si	Parameter	Si	Parameter	Si
pH	1.00	PM2.5	1.95	pH	1.09
DO	1.09	PM10	2.75	Minyak	0.70
TDS	0.90	CO	1.38	Pb	0.85
COD	0.97	NOx	1.48		
BOD	0.81				

Syarat pengujian menyatakan bahwa jika nilai normalisasi  $Si > 1$  menunjukkan parameter yang melampaui baku mutu. Dari hasil normalisasi seperti pada tabel 6 di atas, terlihat bahwa hampir seluruh parameter udara memiliki nilai Si jauh di atas 1, sementara parameter air dan tanah sebagian besar masih berada di sekitar atau di bawah nilai ambang.

### Perhitungan Indeks Kualitas per Media

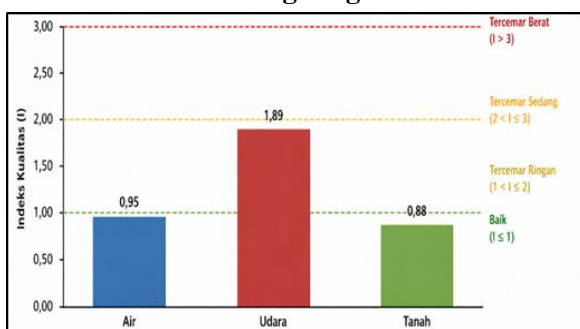
Berdasarkan nilai normalisasi, indeks kualitas masing-masing media dihitung menggunakan rata-rata aritmatika.

Tabel 7. Indeks Kualitas Lingkungan

Media	Nilai Indeks	Kategori
Air	0.95	Baik - tercemar ringan
Udara	1.89	Tercemar sedang
Tanah	0.88	Baik
<b>Total</b>	<b>1.24</b>	<b>Tercemar ringan</b>

Hasil perhitungan indeks kualitas per media pada tabel 7 di atas menunjukkan bahwa pencemaran lingkungan di bengkel didominasi oleh media udara dengan kategori tercemar sedang, sedangkan media air dan tanah masih berada dalam kondisi relatif baik. Indeks total sebesar 1.24 mengindikasikan bahwa secara keseluruhan lingkungan berada pada kategori tercemar ringan.

### Visualisasi Indeks Lingkungan



Gambar 1. Perbandingan Indeks Kualitas Lingkungan per Media

Gambar 1 diatas menunjukkan perbandingan nilai indeks kualitas lingkungan pada masing-masing media yang diukur di area bengkel. Terlihat jelas bahwa indeks kualitas udara

memiliki nilai paling tinggi dibandingkan media lainnya, yang menunjukkan bahwa udara merupakan kontributor utama terhadap pencemaran lingkungan di lokasi penelitian. Sementara itu, nilai indeks tanah yang paling rendah menunjukkan bahwa sistem pengendalian pencemaran tanah relatif efektif.

### Integrasi Hasil terhadap Model

Penggunaan formulasi indeks dalam penelitian ini memungkinkan integrasi berbagai parameter lingkungan menjadi satu nilai komposit. Persamaan normalisasi digunakan untuk menyetarakan satuan parameter yang berbeda, sedangkan perhitungan indeks per media dan indeks total memungkinkan identifikasi kontribusi relatif masing-masing media terhadap pencemaran.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa model yang dikembangkan mampu:

1. mengidentifikasi media dominan pencemaran (udara),
2. membedakan tingkat pencemaran antar media,
3. serta memberikan gambaran kuantitatif kondisi lingkungan secara keseluruhan.

### PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pencemaran lingkungan di bengkel Program Studi Pendidikan Teknik Mesin berada pada kategori tercemar ringan ( $I = 1,24$ ), dengan kontribusi dominan berasal dari media udara ( $I = 1,89$ ), diikuti oleh air ( $I = 0,95$ ) dan tanah ( $I = 0,88$ ). Pola ini mengindikasikan bahwa aktivitas utama bengkel, khususnya pengelasan dalam ruang tertutup, pengoperasian mesin pembakaran, serta kedekatan dengan jalan raya, berperan signifikan dalam meningkatkan beban pencemaran udara. Temuan ini konsisten dengan studi yang menunjukkan bahwa sumber pencemaran udara di lingkungan perkotaan dan semi industri umumnya berasal dari kombinasi aktivitas pembakaran dan lalu lintas kendaraan (Zhang et al., 2021; Santoso et al., 2020).

Jika dibandingkan dengan pendekatan evaluasi kualitas lingkungan yang telah ada, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada satu media secara terpisah. Misalnya, studi oleh Hossain & Patra, (2020) dan Mukate et al., (2019) mengembangkan indeks kualitas air berbasis multi-parameter, namun tidak mengintegrasikan media lingkungan lainnya. Sementara itu, Schuwirth, (2020) telah mengarah pada integrasi parameter dalam satu media (air), tetapi belum mencakup pendekatan lintas media. Dalam konteks ini, hasil penelitian menunjukkan bahwa

penggunaan model indeks terpadu mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi lingkungan dibandingkan pendekatan parsial.

Pendekatan integratif dalam penelitian ini juga sejalan dengan upaya pengembangan model evaluasi lingkungan yang lebih holistik, seperti yang dilakukan oleh Gupta & Gupta, (2021) dalam pengembangan indeks pencemaran sungai dan Fonseca et al., (2021) melalui pendekatan *M-Triad*. Namun demikian, kedua pendekatan tersebut memiliki kompleksitas yang relatif tinggi, baik dari segi kebutuhan data maupun metode analisis. Sebaliknya, model yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan formulasi yang lebih sederhana, namun tetap mampu mengidentifikasi kontribusi relatif masing-masing media terhadap pencemaran lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa penyederhanaan model tidak selalu mengurangi kualitas analisis, selama tetap didasarkan pada prinsip ilmiah yang valid.

Pada media air, nilai indeks yang relatif rendah menunjukkan bahwa pencemaran bersifat ringan dan tidak kontinu. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh karakteristik aktivitas bengkel yang tidak menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar serta adanya sistem lantai beton yang membatasi infiltrasi. Temuan ini berbeda dengan studi kualitas air pada lingkungan industri yang umumnya menunjukkan tingkat pencemaran lebih tinggi akibat pembuangan limbah cair secara langsung (Gupta D.P et al., 2020). Dengan demikian, konteks operasional menjadi faktor kunci dalam menentukan tingkat pencemaran pada masing-masing media.

Sementara itu, kualitas tanah yang relatif baik menunjukkan efektivitas sistem pengendalian pencemaran berbasis infrastruktur fisik, seperti penggunaan lantai beton dan pengelolaan oli yang baik. Hal ini sejalan dengan temuan Aravindh et al., (2020) yang menyatakan bahwa indikator kualitas tanah sangat dipengaruhi oleh intensitas dan durasi paparan kontaminan. Rendahnya nilai indeks tanah dalam penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat potensi sumber pencemar, mekanisme kontrol yang ada mampu meminimalkan dampaknya.

Sebaliknya, tingginya indeks kualitas udara menegaskan bahwa media ini merupakan komponen paling rentan terhadap pencemaran di lingkungan bengkel. Nilai parameter partikulat (PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>) yang tinggi menunjukkan dominasi emisi dari proses pengelasan dan aktivitas kendaraan, yang diperkuat oleh kondisi

ruang tertutup dengan ventilasi terbatas. Temuan ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa aktivitas pengelasan dalam ruang tertutup dapat meningkatkan konsentrasi partikulat dan gas berbahaya secara signifikan (Zhang et al., 2021). Selain itu, kontribusi eksternal dari lalu lintas jalan raya juga memperburuk kondisi kualitas udara, sebagaimana dilaporkan dalam studi pemodelan kualitas udara di kawasan perkotaan (East et al., 2021).

Dari sisi metodologi, penggunaan pendekatan indeks dalam penelitian ini menunjukkan keunggulan dalam hal integrasi data multi-parameter dan kemudahan interpretasi. Namun demikian, seperti yang diungkapkan oleh Klik et al., (2020), penggunaan indeks lingkungan perlu mempertimbangkan validitas dan sensitivitas terhadap variasi parameter. Dalam penelitian ini, pendekatan normalisasi sederhana dan pembobotan yang setara digunakan untuk menjaga keseimbangan antar parameter. Meskipun pendekatan ini efektif untuk konteks pendidikan vokasi, pengembangan lebih lanjut dengan metode pembobotan yang lebih kompleks, seperti *Analytical Hierarchy Process (AHP)* atau pendekatan probabilistik (Mcgee et al., 2021), dapat meningkatkan akurasi model.

Novelty utama penelitian ini terletak pada pengembangan model indeks terpadu yang mengintegrasikan tiga media lingkungan (air, udara, dan tanah) dalam satu kerangka evaluasi yang sederhana, aplikatif, dan kontekstual untuk pendidikan teknik mesin. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada satu media atau menggunakan pendekatan yang kompleks, model ini dirancang untuk dapat digunakan sebagai alat evaluasi sekaligus media pembelajaran. Hasil penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada pengembangan metode evaluasi pencemaran lingkungan, tetapi juga pada integrasi aspek lingkungan dalam pendidikan teknik mesin.

Selain itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa pendekatan berbasis model sederhana dapat digunakan untuk mengidentifikasi pola pencemaran secara efektif, bahkan dalam kondisi keterbatasan data. Hal ini membuka peluang bagi pengembangan penelitian lanjutan yang mengintegrasikan teknologi sensor, *Internet of Things (IoT)*, atau kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi dan real-time monitoring kualitas lingkungan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengaplikasikan model indeks terpadu pencemaran lingkungan yang mengintegrasikan parameter kualitas air, udara, dan tanah dalam satu kerangka evaluasi kuantitatif. Model yang digunakan terbukti mampu menyederhanakan kompleksitas data multi-parameter menjadi satu nilai indeks yang representatif dan mudah diinterpretasikan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi lingkungan bengkel Program Studi Pendidikan Teknik Mesin berada pada kategori tercemar ringan ( $I = 1,24$ ). Secara parsial, media udara merupakan kontributor utama pencemaran dengan kategori tercemar sedang ( $I = 1,89$ ), sedangkan media air berada pada kondisi baik menuju tercemar ringan ( $I = 0,95$ ), dan media tanah berada pada kategori baik ( $I = 0,88$ ). Pola ini menegaskan bahwa aktivitas pengelasan dalam ruang tertutup, emisi kendaraan, serta pengaruh lingkungan eksternal (lalu lintas) menjadi faktor dominan dalam menentukan kualitas lingkungan di lokasi penelitian.

Model yang dikembangkan tidak hanya mampu mengidentifikasi tingkat pencemaran secara komprehensif, tetapi juga menunjukkan kontribusi relatif masing-masing media lingkungan. Dengan demikian, model ini efektif digunakan sebagai alat evaluasi lingkungan yang sederhana, aplikatif, dan relevan untuk konteks pendidikan vokasi, khususnya teknik mesin.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dan dikembangkan lebih lanjut dikeduain hari:

1. Jumlah titik sampling terbatas  
Pengambilan data hanya dilakukan pada tiga titik sampling, sehingga variasi spasial lingkungan belum tergambar secara lebih luas dan detail.
2. Pembobotan parameter masih sederhana  
Model menggunakan pendekatan rata-rata aritmatika dengan bobot yang sama untuk setiap parameter, sehingga belum mempertimbangkan tingkat pengaruh relatif masing-masing parameter terhadap kualitas lingkungan.
3. Parameter lingkungan masih terbatas  
Parameter yang digunakan difokuskan pada indikator utama yang relevan dengan aktivitas bengkel, sehingga belum mencakup parameter lanjutan seperti senyawa organik volatil (VOC) atau logam berat tambahan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aravindh, S. ... Balachandar, D. (2020). Development of a soil biological quality index for soils of semi-arid tropics. *SOIL*, 6(2), 483–497. <https://doi.org/10.5194/soil-6-483-2020>
- East, J. ... Garcia-Menendez, F. (2021). Air quality modeling to inform pollution mitigation strategies in a Latin American megacity. *The Science of the Total Environment*, 776, 145894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145894>
- Fonseca, M. F. ... Fonseca, G. (2021). M-Triad: An improvement of the sediment quality triad. *Science of The Total Environment*, 770, 145245. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145245>
- Gupta D.P, M. ... Prayoga B, T. (2020). Studi Penentuan Status Mutu Air Menggunakan Metode Indeks Pencemaran Dan WQI Di Tukad Badung, Denpasar. *Jurnal Teknik Pengairan*, 11(2), 83–93.
- Gupta, S., & Gupta, S. K. (2021). Development and evaluation of an innovative Enhanced River Pollution Index model for holistic monitoring and management of river water quality. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(21), 27033–27046. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12501-z>
- Hossain, M., & Patra, P. K. (2020). Water pollution index – A new integrated approach to rank water quality. *Ecological Indicators*, 117, 106668. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.106668>
- Huo, Z. ... Ma, F. (2020). A Soil Environmental Quality Assessment Model Based on Data Fusion and Its Application in Hebei Province. *Sustainability*, Vol. 12, p. 6804. <https://doi.org/10.3390/su12176804>
- Klik, B. K. ... Kulikowska, D. (2020). Suitability of environmental indices in assessment of soil remediation with conventional and next generation washing agents. *Scientific Reports*, 10(1), 20586. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77312-7>
- Mcgee, G. ... Science, A. (2021). Bayesian Multiple Index Models for Environmental Mixtures. *Biometrics*, 1–25.
- Mukate, S. ... Sawant, A. (2019). Development of new integrated water quality index (IWQI)

- model to evaluate the drinking suitability of water. *Ecological Indicators*, 101, 348–354.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034>
- Ratnaningsih, D. ... Kurniawan, B. (2020). Penggunaan IKA-INA dalam Penilaian Kualitas Air dengan Dua Skenario Kurva Sub-Indeks (The Use of INA-WQI for Water Quality Assessment with Two Sub-Index Curve Scenarios). *Jurnal Ecolab*, 14, 125–135.  
<https://doi.org/10.20886/jklh.2020.14.2.125-135>
- Santoso, M. ... Suprayadi, L. S. (2020). Assessment of Urban Air Quality in Indonesia. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 2142–2158.  
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0451>
- Schuwirth, N. (2020). Towards an integrated surface water quality assessment: Aggregation over multiple pollutants and time. *Water Research*, 186, 116330.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116330>
- Zhang, M. ... Gao, L. (2021). Study on Comprehensive Assessment of Environmental Impact of Air Pollution. *Sustainability*, Vol. 13, p. 476.  
<https://doi.org/10.3390/su13020476>