

Penggunaan Aplikasi *Machine Learning* (ML) dalam Kurikulum Perubahan Iklim

Widya Puji Astuti^{1✉}, Munir ²
(1,2) Universitas Pendidikan, Indonesia

✉ Corresponding author
[widya.astuti80@upi.edu]

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan Machine Learning (ML) dalam mendukung pemahaman siswa SMK Pertanian di Indonesia terhadap isu perubahan iklim. Melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR), artikel-artikel relevan dikumpulkan dari basis data ERIC dan Science Direct dan dianalisis secara tematik untuk menemukan pola serta kontribusi utama dari ML dalam pembelajaran mitigasi perubahan iklim. Temuan utama menunjukkan bahwa penerapan ML dalam kurikulum berpotensi memperkuat keterampilan analisis siswa terkait perubahan iklim, memberi wawasan praktis mengenai strategi mitigasi, dan adaptasi yang dapat diimplementasikan. Hasil ini mengindikasikan adanya dampak positif ML dalam meningkatkan pemahaman konseptual siswa terhadap isu-isu lingkungan. Implikasi praktis dari penelitian ini adalah bahwa integrasi ML ke dalam kurikulum pendidikan SMK Pertanian di Indonesia bisa menjadi strategi efektif untuk mempersiapkan siswa menghadapi tantangan perubahan iklim, sekaligus berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan. Namun, kesenjangan penelitian masih ada terkait penerapan ML dalam pendidikan mitigasi perubahan iklim di tingkat SMK, khususnya pada konteks kurikulum berbasis kompetensi.

Kata Kunci: *machine learning, kurikulum dan pembelajaran, adaptasi dan mitigasi, climate change*

Abstract

This study aims to explore the application of Machine Learning (ML) in supporting agricultural vocational high school (SMK) students in Indonesia in understanding climate change issues. Through a Systematic Literature Review (SLR) approach, relevant articles were gathered from ERIC and Science Direct databases and analyzed thematically to identify patterns and key contributions of ML in climate change mitigation education. The main findings indicate that integrating ML into the curriculum has the potential to enhance students' analytical skills regarding climate change, providing practical insights into implementable mitigation and adaptation strategies. These results suggest a positive impact of ML on improving students' conceptual understanding of environmental issues. The practical implications of this research are that the integration of ML into the agricultural vocational high school curriculum in Indonesia could serve as an effective strategy to prepare students for climate change challenges while contributing to sustainable development. However, research gaps remain in the application of ML for climate change mitigation education at the vocational level, particularly within competency-based curricula.

Keywords: *machine learning, curriculum and learning, adaptation and mitigation, climate change*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan atau *artificial intelligence* (AI), khususnya *machine learning* (ML), telah memberikan kontribusi besar dalam memecahkan permasalahan kompleks di berbagai bidang, termasuk mitigasi perubahan iklim. *Machine learning* sebagai cabang AI memiliki kemampuan adaptif dalam memproses data berskala besar secara otomatis, mengidentifikasi pola, serta memberikan hasil prediktif tanpa intervensi manusia secara langsung

(Helm et al., 2020). Dalam konteks perubahan iklim, ML telah diterapkan secara luas dalam pemodelan iklim, prediksi cuaca ekstrem, analisis dampak lingkungan, serta optimalisasi penggunaan energi untuk mendukung keputusan berbasis data yang lebih akurat dan efektif dalam upaya mitigasi perubahan iklim (Rolnick et al., 2023).

Dampak perubahan iklim di Indonesia sangat dirasakan di sektor pertanian, yang rentan terhadap perubahan cuaca dan lingkungan. Sebagai negara dengan sektor pertanian yang kuat, Indonesia menghadapi tantangan besar dalam mempersiapkan generasi muda untuk mengelola sumber daya alam secara berkelanjutan dan menghadapi perubahan iklim yang semakin mendesak (Jomegi et al., 2024). Integrasi ML dalam pendidikan vokasi pertanian, khususnya di Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) Pertanian, merupakan langkah strategis untuk meningkatkan kemampuan analisis data iklim, keterampilan teknologi, dan kesiapan adaptif siswa terhadap tantangan lingkungan modern (Khuriyati et al., 2023; Tang, 2024).

Pendidikan berbasis ML memiliki potensi besar dalam membantu siswa SMK Pertanian memahami perubahan iklim secara ilmiah dan menerapkan strategi mitigasi yang relevan. Penerapan ML dalam kurikulum pertanian memungkinkan siswa untuk melakukan analisis data iklim yang lebih mendalam, mengasah keterampilan berpikir kritis dan analitis, serta mempersiapkan mereka untuk menjadi tenaga kerja yang kompeten dalam memitigasi dampak perubahan iklim (Agrawal & Jaggi, 2023). Dengan demikian, ML bukan hanya alat teknologi, tetapi juga sarana pengembangan keterampilan yang esensial dalam pendidikan lingkungan dan keberlanjutan.

Meskipun manfaat ML dalam pendidikan perubahan iklim sangat besar, penelitian tentang penerapan ML di kurikulum SMK Pertanian di Indonesia masih terbatas. Kesenjangan penelitian ini menggarisbawahi perlunya kajian literatur yang komprehensif untuk mengidentifikasi strategi, tantangan, dan kontribusi ML dalam pendidikan mitigasi perubahan iklim. Studi ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis tentang penggunaan ML dalam kurikulum pendidikan pertanian di Indonesia, untuk menyajikan panduan implementasi yang dapat memperkuat program adaptasi dan mitigasi perubahan iklim di sektor pendidikan vokasi.

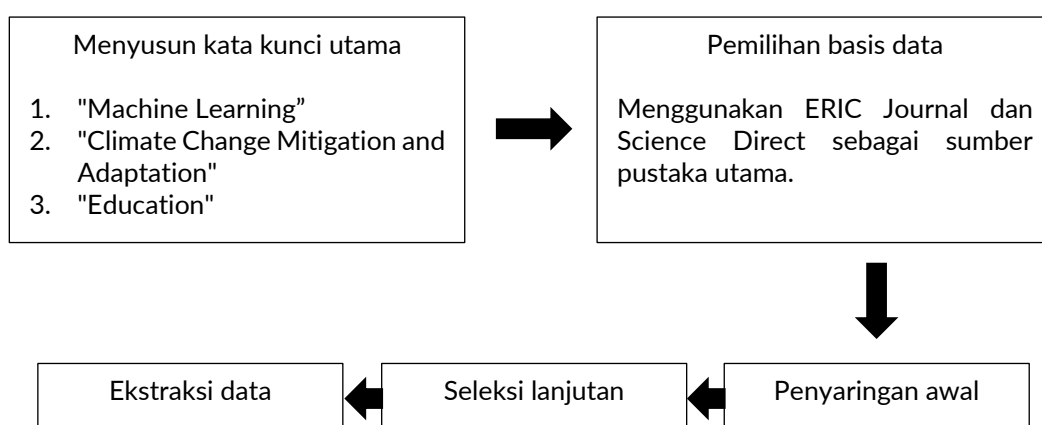
METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat deskriptif kualitatif dengan metode *Systematic Literatur Review* (SLR). SLR adalah suatu metode yang melibatkan tinjauan sistematis terhadap pencarian yang komprehensif, integrasi hasil pencarian, dan kritik yang luas serta mampu membuktikan keterkaitan literatur-literatur tersebut dengan pertanyaan dalam penelitian (Siddaway et al., 2019). Penelitian deskriptif ini dilakukan untuk memberikan pemahaman mendalam terkait aplikasi dan kontribusi *Machine Learning* dalam mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, khususnya di bidang pendidikan. Objek penelitian dalam SLR ini adalah artikel dan jurnal ilmiah yang mengkaji penerapan *Machine Learning* dalam konteks perubahan iklim, baik secara umum maupun yang spesifik pada pendidikan. Penelitian ini mencakup studi-studi dari dua database utama, yaitu ERIC Journal dan Science Direct Journal, yang telah teruji kredibilitasnya dalam menyediakan literatur akademis berkualitas tinggi. Pengumpulan data dilakukan dengan menerapkan teknik pencarian yang terstruktur dan sistematis. Proses ini melibatkan penggunaan kata kunci seperti "Machine Learning," "Climate Change Mitigation and Adaptation," dan "Education" pada dua basis data, yaitu ERIC dan Science Direct. Selain itu, seleksi artikel didasarkan pada kesesuaian dengan topik penelitian, kualitas studi, dan relevansi isi, terutama yang berhubungan dengan penerapan ML untuk adaptasi dan mitigasi perubahan iklim dalam kurikulum dan proses pembelajaran. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode analisis tematik, yang bertujuan untuk mengidentifikasi pola, tema utama, serta kesenjangan penelitian. Tahapan analisis dimulai dengan ekstraksi data yang relevan dari artikel yang telah diseleksi, dilanjutkan dengan proses coding untuk mengelompokkan informasi sesuai kategori yang telah ditentukan, seperti "Implementasi ML," "Keuntungan dalam Pendidikan," dan "Dampak pada Adaptasi Iklim." Hasil analisis ini diringkas untuk menyajikan pandangan menyeluruh tentang kontribusi *Machine Learning* dalam mitigasi dan adaptasi perubahan iklim melalui pendidikan.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Ekslusi

Kriteria	Inklusi	Ekslusi
Tahun Publikasi	Artikel dipublikasikan antara 2014 dan 2024 untuk memastikan relevansi terkini	Artikel yang dipublikasikan sebelum 2014, mengingat perkembangan ML yang pesat dan cepat usang
Bahasa	Artikel dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia	Artikel dalam bahasa lain yang sulit diakses dan dapat menghambat pemahaman yang mendalam
Topik Penelitian	Artikel yang mengkaji penerapan ML dalam mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, terutama dalam pendidikan	Artikel yang tidak memiliki kaitan langsung dengan perubahan iklim atau pendidikan
Jenis Studi	Penelitian empiris, termasuk studi kasus, eksperimen, atau model implementasi di bidang pendidikan atau mitigasi iklim	Artikel yang bersifat opini, editorial, atau artikel yang tidak mengandung data empiris atau analisis mendalam
Aksesibilitas	Artikel dengan akses teks penuh (full text) untuk penelaahan yang komprehensif	Artikel yang tidak tersedia secara lengkap atau hanya memiliki akses abstrak

Proses analisis tematik diawali dengan ekstraksi data utama dari artikel yang memenuhi kriteria seleksi. Setiap artikel dibaca untuk mengidentifikasi informasi kunci yang relevan, termasuk tujuan, metode, hasil, serta temuan terkait penerapan Machine Learning (ML) dalam pendidikan dan mitigasi perubahan iklim. Langkah selanjutnya adalah pengkodean (*coding*), di mana setiap potongan informasi diberi label atau kode yang mencerminkan tema utama yang muncul dari literatur tersebut. Kode-kode ini mencakup hal-hal seperti "Implementasi ML dalam Pendidikan," "Manfaat ML bagi Siswa," dan "Peran ML dalam Adaptasi Iklim." Pengkodean dilakukan secara terbuka, memungkinkan peneliti untuk menambahkan kode baru saat tema baru muncul dari artikel yang dianalisis. Tahap akhir adalah pengelompokan tema (*thematic grouping*), di mana kode yang serupa atau saling berhubungan dikelompokkan ke dalam tema yang lebih besar. Tema utama yang muncul dari analisis ini meliputi "Implementasi ML dalam Pendidikan," "Keuntungan ML dalam Pembelajaran," "Dampak ML pada Adaptasi Iklim," dan "Kesenjangan Penelitian." Setiap tema dianalisis secara mendalam untuk mengidentifikasi pola atau temuan yang konsisten, serta kesenjangan dalam penelitian yang ada. Hasil ini kemudian dirangkum untuk memberikan pandangan komprehensif mengenai kontribusi ML dalam pendidikan mitigasi perubahan iklim.

**Gambar 1. Alur SLR**

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Aplikasi *Machine Learning* (ML) adalah bagian dari metodologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence) yang dirancang untuk memungkinkan sistem menyelesaikan tugas melalui analisis data

dan pengenalan pola. Ada pula yang mendefinisikan ML sebagai algoritma yang digunakan untuk memodelkan pengaruh suhu bulanan dan curah hujan terhadap variabilitas hasil, serta untuk mempelajari dampak skenario perubahan iklim pada hasil tersebut (Rifath et al., 2024). Tujuan utama dari *machine learning* adalah agar sistem yang menggunakan model AI ini mampu merespons data baru secara dinamis tanpa memerlukan pemrograman tambahan atau intervensi manusia lainnya. *Machine learning* juga memungkinkan penerapan metode otomatis dalam pemantauan risiko iklim melalui analisis citra satelit (Yang et al., 2024). Kemampuan adaptasi ML ini, yang didukung oleh pembaruan literasi secara berkelanjutan, mendorong peningkatan respons dan efektivitas tindakan sistem dari waktu ke waktu.

Aplikasi *machine learning* telah diadopsi dengan cepat dan memberikan dampak yang signifikan pada berbagai industri, seperti layanan kesehatan, pendidikan, otomotif, serta dalam kehidupan sehari-hari dan komunikasi. Penggunaan *machine learning* dalam mitigasi dan adaptasi perubahan iklim saat ini dianggap sebagai salah satu solusi terbaik yang tersedia di berbagai disiplin ilmu, termasuk astronomi, pertanian, dan pariwisata. Namun, dalam ilmu komputer, penerapan *machine learning* untuk prediksi hasil panen masih relatif kurang dieksplorasi. Model ML memiliki lima potensi algoritma ansambel yang berbeda, yaitu *Adaptive Boosting (AdaBoost)*, *Gradient Boosting Machine (GBM)*, *XGBoost*, *LightGBM*, dan *Random Forest (RF)*. Selain itu, terdapat algoritma lain yang terus dikembangkan sebagai bagian dari pengembangan model ML.

Dalam literatur, penggunaan *machine learning* untuk mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim dipelajari melalui berbagai pendekatan. Pada Tabel 1, tinjauan ini menunjukkan penerapan model ML dari berbagai negara dalam pembelajaran Pendidikan Perubahan Iklim (*Climate Change Education* atau CCE).

Tabel 2. Sumber Literature Review

Label	Penulis	Tahun	Negara	Jenis penelitian	Metode	Topik
P1	(Xiao et al., 2024)	2024	China	Deskriptif	Studi Kasus	Penerapan <i>machine learning</i> dalam melakukan klasifikasi zona iklim serta menentukan pilihan jenis aspal yang optimal untuk infrastruktur perkerasan jalan, dengan mempertimbangkan kondisi perubahan iklim.
P2	(Subramaniam et al., 2024)	2024	Malaysia	Eksploratif	SLR	Dampak dari komite tanggung jawab sosial perusahaan (CSR) dan program lingkungan, sosial, serta tata kelola (ESG) terhadap keberlanjutan bisnis perusahaan.
P3	(Papakyriakou et al., 2024)	2024	Kanada	Eksploratif	Investigation	Analisis penggunaan metodologi <i>machine learning</i> dalam memperbaiki pembuatan data cuaca TMY (Typical

Label	Penulis	Tahun	Negara	Jenis penelitian	Metode	Topik
						Meteorological Year) pada berbagai zona iklim di Kanada.
P4	(Yang et al., 2024)	2024	Indonesia	Eksploratif	R & D	Penggunaan teknologi <i>machine learning</i> bersama citra satelit untuk menilai risiko terkait iklim, dengan contoh studi kasus banjir di wilayah Jakarta.
P5	(Moradian et al., 2023)	2023	Irlandia	Deskriptif	Case study	Pengembangan pendekatan hybrid baru dengan menggabungkan teknik <i>machine learning</i> dan transformasi wavelet diskrit untuk menilai pengaruh perubahan iklim terhadap pola curah hujan di Cork, Irlandia.
P6	(Kushwaha et al., 2024)	2024	Florida, USA	Deskriptif	Studi komparasi	Pemanfaatan model <i>machine learning</i> dalam memprediksi intrusi air asin (<i>saltwater intrusion</i>) di akuifer pesisir, seperti Akuifer Biscayne di Florida, dengan memperhitungkan dampak dari kenaikan permukaan laut dan pemompaan air tanah yang berlebihan.
P7	(Wen et al., 2024)	2024	China	Eksploratif	Quasi-eksperimen	Pengaruh kebijakan pembangunan kota yang tangguh terhadap perubahan iklim (<i>climate-resilient cities</i>) terhadap produktivitas faktor total hijau (<i>green total-factor productivity</i>) di beberapa kota di Tiongkok.
P8	(Ajibade et al., 2023)	2023	Malaysia	Deskriptif	SLR	Penerapan <i>machine learning</i> dalam penelitian tentang perubahan iklim, atau dikenal sebagai riset

Label	Penulis	Tahun	Negara	Jenis penelitian	Metode	Topik
						MLCC (<i>machine learning applications in climate change research</i>).
P9	(Sahoo et al., 2024)	2024	Amerika	Eksploratif	Demonstrasi	Penggunaan teknik <i>machine learning</i> untuk memprediksi kesenjangan hasil panen padi di wilayah India Timur, dengan mempertimbangkan faktor ketidakpastian iklim.
P10	(Bao et al., 2024)	2024	China	Investigasi	Evaluation	Pemahaman model <i>machine learning</i> yang digunakan untuk mengeksplorasi hubungan antara faktor-faktor iklim dan pertumbuhan vegetasi, dengan studi kasus di Provinsi Anhui, China.
P11	(Grenier et al., 2024)	2024	Kanada	Investigasi	Studi analisis data	Perkiraan terjadinya banjir musiman di Kanada yang dipengaruhi oleh perubahan iklim melalui pendekatan statistik dan <i>machine learning</i> .
P12	(Rifath et al., 2024)	2024	USA	Eksploratif	Studi Analisis periodik	Kerangka kerja <i>machine learning</i> yang digunakan untuk menilai dampak perubahan iklim terhadap produktivitas hasil panen jagung dan kedelai di Ohio, Amerika Serikat.
P13	(Mahdizadeh Gharakhanlou & Perez, 2024)	2024	Canada	Deskriptif	Studi analisis data	Model <i>ensemble machine learning</i> yang diterapkan untuk memperkirakan hasil panen tanaman di Kanada dalam konteks perubahan iklim.
P14	(He et al., 2024)	2024	Australia	Deskriptif	Studi Analisis Penilaian	Prediksi perpindahan habitat nematoda sista kentang (<i>Globodera</i>

Label	Penulis	Tahun	Negara	Jenis penelitian	Metode	Topik
						<i>rostochiensis</i> dan <i>G. pallida</i>) ke arah utara seiring perubahan iklim, dengan menggunakan model <i>ensemble machine learning</i> .
P15	(Bamal et al., 2024)	2024	Irlandia	Eksploratif	SLR	Penerapan <i>machine learning</i> dan kecerdasan buatan untuk mengevaluasi dampak perubahan iklim terhadap ketersediaan sumber daya air tanah.

Tabel 2 menunjukkan perspektif yang berbeda, yang menunjukkan variasi dalam metodologi dan hasil aplikasi ML di sektor-sektor yang relevan. Sebagai contoh, penelitian oleh Xiao et al. (2024) di China berfokus pada klasifikasi zona iklim dan seleksi aspal untuk infrastruktur jalan menggunakan teknik machine learning. Studi ini menekankan pentingnya ML dalam menentukan pilihan bahan yang dapat bertahan lebih baik dalam kondisi perubahan iklim. Sebaliknya, penelitian oleh Yang et al. (2024) di Indonesia menggunakan teknologi ML berbasis citra satelit untuk menilai risiko banjir di Jakarta, menunjukkan peran ML dalam pemetaan risiko yang lebih presisi di wilayah-wilayah yang rentan terhadap perubahan iklim. Analisis dari kedua studi ini mengindikasikan bahwa aplikasi ML bukan hanya efektif dalam memperkuat prediksi risiko iklim tetapi juga dalam optimalisasi infrastruktur yang adaptif terhadap perubahan iklim.

Beberapa literatur lain, seperti yang dilakukan oleh Moradian et al. (2023) di Irlandia, memperluas cakupan penerapan ML untuk mengidentifikasi pola curah hujan dan perubahan iklim menggunakan metode hybrid. Teknik ini menggabungkan ML dengan transformasi wavelet diskrit, yang meningkatkan ketepatan model dalam memahami pola hidro-klimatologi. Ini sejalan dengan penelitian oleh Wen et al. (2024) di China yang memeriksa kebijakan pembangunan kota tahan iklim (climate-resilient cities) dengan pendekatan kuasi-eksperimen ML. Studi ini menyoroti dampak positif dari pengelolaan lingkungan kota berbasis ML yang dapat meningkatkan produktivitas hijau dan berkelanjutan. Dapat disimpulkan bahwa literatur-literatur yang dikaji dalam penelitian ini memperkuat argumen bahwa *machine learning* memiliki potensi signifikan dalam adaptasi dan mitigasi, yang pada akhirnya mengarah pada manajemen iklim yang lebih berkelanjutan di berbagai negara dan sektor.

Tabel 3. Definisi *Machine Learning* dalam Kontenks Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim

Label	Definisi
P1	Teknik pembelajaran mesin tanpa pengawasan digunakan untuk mengelompokkan data berdasarkan kemiripan fiturnya, memungkinkan pengelompokan titik data yang serupa.
P2	Subkategori AI ini berfungsi untuk mengidentifikasi hubungan tersembunyi dan tema utama dalam penelitian yang luas terkait keuangan berkelanjutan.
P3	Secara sistematis, pendekatan ini menetapkan parameter cuaca yang penting dan faktor pembobotan, disesuaikan dengan kondisi iklim lokal, guna meningkatkan akurasi dalam pembuatan file cuaca TMY.
P4	Melalui pembelajaran mesin dan penginderaan jauh, survei yang sebelumnya membutuhkan tenaga dan waktu intensif kini dapat digantikan oleh penilaian digital yang lebih cepat dan lebih akurat.

Label	Definisi
P5	Pembelajaran mesin diterapkan dalam pemantauan dan prediksi kondisi hidro-klimatologi, memberikan dukungan teknologi untuk aplikasi di bidang ini.
P6	Tujuh model pembelajaran mesin, yaitu regresi aditif (AR), mesin vektor pendukung (SVM), pohon dengan pemangkasan kesalahan (REPTree), pengantongan, subruang acak (RSS), hutan acak (RF), dan jaringan saraf buatan (ANN), digunakan untuk memprediksi indeks air tanah (SWI) berdasarkan data nutrisi pesisir.
P7	Model pembelajaran mesin dirancang untuk mengurangi bias estimasi sebanyak mungkin dan mencapai tingkat identifikasi efek kausal yang lebih akurat.
P8	Pembelajaran mesin adalah seperangkat alat, metode, dan sistem teknologi komputasi yang saat ini digunakan untuk mengeksplorasi dampak perubahan iklim, menjadikannya bagian inti dari penelitian MLCC.
P9	Algoritme pembelajaran mesin digunakan untuk mengidentifikasi kesenjangan hasil panen padi, yang bertujuan untuk mendukung intensifikasi pertanian yang berkelanjutan.
P10	Metode pembelajaran mesin yang dikenal sebagai eXplainable Artificial Intelligence (XAI) diusulkan sebagai solusi yang membuat model berbasis pembelajaran mesin lebih transparan, serta meningkatkan pemahaman tentang hubungan vegetasi dan iklim.
P11	Pembelajaran mesin meningkatkan ketepatan dalam penilaian risiko banjir, membantu pengelolaan risiko di kawasan yang rentan.
P12	Algoritma pembelajaran mesin digunakan untuk memodelkan pengaruh suhu bulanan dan tingkat curah hujan terhadap variasi hasil tanaman, serta mengevaluasi dampak skenario perubahan iklim pada hasil tersebut.
P13	Model mekanistik, yang juga disebut sebagai model berbasis proses atau model pertumbuhan tanaman, dikembangkan berdasarkan proses fisiologis dan biologis yang mengatur pertumbuhan dan perkembangan tanaman.
P14	Pembelajaran mesin menjadi alat yang kuat dalam memprediksi distribusi spesies karena kemampuannya mempelajari data kompleks dan menghasilkan prediksi akurat.
P15	Pembelajaran mesin, bagian dari AI, berfokus pada pengembangan algoritme yang mengenali pola dalam data dan menghasilkan prediksi yang relevan.

Berdasarkan informasi yang ditunjukkan dalam Tabel 3, dapat diketahui berbagai definisi ML yang relevan dalam konteks mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, yang diambil dari beberapa perspektif penelitian. Definisi ini menunjukkan beragam pendekatan, dari pengelompokan data berbasis kesamaan fitur (seperti pada penelitian Xiao et al., (2024)) hingga penggunaan algoritma kompleks untuk pemodelan dan prediksi dampak iklim (seperti yang dilakukan oleh Kushwaha et al., (2024) di Florida, AS). Setiap pendekatan menyoroti fungsi ML dalam memproses data skala besar dan mengidentifikasi pola-pola kritis dalam perubahan iklim. Teknik seperti *eXplainable Artificial Intelligence* (XAI) yang dikembangkan Bao et al. (2024) menekankan aspek interpretabilitas model ML dalam menghubungkan faktor-faktor iklim dengan pertumbuhan vegetasi. Definisi yang disajikan dalam penelitian ini menggarisbawahi bahwa ML tidak hanya membantu dalam prediksi tetapi juga meningkatkan pemahaman ilmiah terkait dampak lingkungan.

Studi lain yang diuraikan dalam penelitian ini juga menunjukkan bahwa aplikasi ML yang lebih spesifik, seperti model *ensemble* yang digunakan He et al. (2024) untuk memperkirakan pergeseran habitat spesies tertentu akibat perubahan iklim. Algoritme ini tidak hanya menunjukkan keunggulan ML dalam pemetaan ekologis tetapi juga dalam menginformasikan langkah-langkah perlindungan keanekaragaman hayati. Selain itu, beberapa studi mengindikasikan bahwa kemampuan ML untuk memproses data kompleks secara mandiri (tanpa supervisi) menjadi alat penting untuk mengidentifikasi ancaman iklim, seperti intrusi air asin di akuifer pesisir yang diteliti oleh Kushwaha et al., (2024). Dengan beragam metode ini, dapat disimpulkan bahwa ML menawarkan pendekatan adaptif dalam menganalisis dan mengantisipasi efek perubahan iklim, yang memfasilitasi upaya mitigasi dan adaptasi yang lebih efektif.

Pembahasan

Berdasarkan kelima belas sumber rujukan yang ditinjau, konsepsi *machine learning* dapat dipahami sebagai aplikasi digital bagian dari Artificial Intelligence yang berfokus pada data algoritme untuk mampu mengolah data sehingga dapat memprediksi hal-hal yang berhubungan dengan kebutuhan manusia khususnya mengenai perubahan iklim di dunia. Merujuk pada penelitian-penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa ML telah menunjukkan potensi besar dalam mengolah data lingkungan yang kompleks untuk memprediksi perubahan iklim dan dampaknya pada ekosistem dan kehidupan manusia. Metode ini memungkinkan pengumpulan, analisis, dan interpretasi data yang lebih mendalam, sehingga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam menghadapi perubahan iklim (Zennaro et al., 2021). Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa aplikasi ML dalam mitigasi iklim terus berkembang seiring dengan peningkatan kompleksitas model yang digunakan, seperti model prediksi cuaca ekstrem dan pemetaan risiko bencana alam (Jain et al., 2023).

Dalam penerapannya, ML memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi pola-pola tertentu yang terkait dengan perubahan iklim, seperti perubahan suhu, curah hujan, dan pergerakan massa air. Kemampuan ini didukung oleh algoritma yang secara terus-menerus belajar dari data yang ada, sehingga hasil yang dihasilkan semakin akurat dari waktu ke waktu (Bochenek & Ustrnul, 2022). Sebagai contoh, algoritma ML mampu mengintegrasikan data dari berbagai sumber, seperti citra satelit dan data cuaca, untuk memberikan prediksi yang lebih komprehensif. Metode ini terbukti efisien dalam mempercepat proses identifikasi risiko, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kesiapsiagaan dalam menghadapi bencana terkait iklim (Salcedo-Sanz et al., 2020).

Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, penelitian terbaru juga menunjukkan bagaimana *machine learning* dapat diterapkan dalam pengelolaan sumber daya alam secara lebih efisien dan berkelanjutan. Penerapan ML dalam bidang ini, misalnya dalam memonitor deforestasi dan perubahan tutupan lahan, telah terbukti membantu dalam menjaga keberlanjutan lingkungan (Raihan, 2023). Algoritma ML juga memungkinkan peningkatan akurasi dalam prediksi distribusi spesies yang terancam punah akibat perubahan iklim. Dengan demikian, aplikasi ML tidak hanya berfokus pada aspek mitigasi, tetapi juga adaptasi, khususnya dalam perlindungan keanekaragaman hayati (Shivaprakash et al., 2022).

Penelitian telah menunjukkan bahwa pengembangan model ML yang transparan, seperti eXplainable Artificial Intelligence (XAI), memberikan keunggulan dalam pemahaman yang lebih baik terkait dampak iklim pada sistem ekologi. Model ML yang dapat dijelaskan ini memungkinkan peneliti untuk menafsirkan hasil prediksi dengan lebih rinci, sehingga menjadi alat penting dalam pengambilan keputusan strategis (Barredo Arrieta et al., 2020). Selain itu, transparansi dalam model ini dapat mengurangi bias estimasi dan meningkatkan akurasi dalam analisis data iklim, suatu aspek penting dalam memastikan keberlanjutan penelitian di bidang ini (Kolevatova et al., 2021).

Penggunaan ML dalam konteks adaptasi iklim juga melibatkan pemanfaatan algoritma untuk pemodelan skenario perubahan iklim yang berbeda, yang membantu mengantisipasi dampak jangka panjang pada pertanian, air, dan infrastruktur. Hal ini menjadi relevan, terutama dalam menghadapi kondisi cuaca ekstrem yang semakin tidak menentu (Leal Filho et al., 2022). Sebagai contoh, ML digunakan dalam pemodelan curah hujan dan suhu untuk mengevaluasi kemungkinan penurunan hasil pertanian. Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi ML dapat memainkan peran kunci dalam menyusun strategi adaptasi yang lebih baik, termasuk dalam optimalisasi sumber daya dan mitigasi risiko terhadap ketahanan pangan (Balasundram et al., 2023).

Dalam beberapa studi lain, *machine learning* juga ditemukan mampu memberikan kontribusi signifikan dalam upaya mitigasi perubahan iklim melalui efisiensi energi dan manajemen emisi karbon. Teknologi ML diterapkan untuk mengembangkan sistem kontrol cerdas yang secara efektif mengurangi konsumsi energi pada bangunan dan industri (Ma et al., 2023; Sharma, 2020). Di sektor transportasi, ML mendukung pengembangan kendaraan otonom dan pemodelan aliran lalu lintas yang lebih efisien, yang pada gilirannya dapat mengurangi emisi gas rumah kaca. Implementasi ini sejalan dengan agenda global dalam mencapai target emisi karbon nol bersih (Miglani & Kumar, 2019; Zhang et al., 2024).

Dalam analisis mengenai dampak ML pada sistem ekologi dan iklim, berbagai penelitian juga menyoroti pentingnya pemodelan berbasis proses fisiologis dan biologis. Model mekanistik ini

memungkinkan pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana perubahan iklim dapat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Zhong et al., 2024). Dengan menggunakan pendekatan ini, para peneliti dapat membangun skenario adaptasi yang lebih spesifik bagi sektor pertanian, yang penting untuk menjaga ketahanan pangan di masa depan. Penerapan ini menunjukkan bahwa ML tidak hanya mendukung mitigasi, tetapi juga secara aktif membantu pengembangan langkah-langkah adaptasi (Crane-Droesch, 2018).

KESIMPULAN

Penggunaan Machine Learning dalam pendidikan menawarkan peluang penting untuk memahami perubahan iklim dan meningkatkan kesadaran masyarakat dalam upaya mitigasi dan adaptasi. Dalam kurikulum SMK Pertanian, penerapan Machine Learning dapat mendukung pengembangan keterampilan analitis siswa dalam mengelola risiko lingkungan. Tantangan dalam implementasi ini meliputi keterbatasan infrastruktur teknologi dan kebutuhan pelatihan guru. Solusi potensial mencakup pengadaan perangkat pendukung, kolaborasi dengan lembaga penelitian, dan peningkatan pelatihan guru. Penelitian ini menyarankan agar ada studi lanjutan yang mengeksplorasi efektivitas Machine Learning dalam pendidikan mitigasi iklim melalui pendekatan kuantitatif, sehingga kurikulum dapat lebih efektif mengintegrasikan aspek-aspek perubahan iklim bagi siswa SMK Pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, R. C., & Jaggi, S. (2023). Transforming Agricultural Education for a Sustainable Future. In *Transformation of Agri-Food Systems* (pp. 357–369). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8014-7_25
- Ajibade, S.-S. M., Zaidi, A., Bekun, F. V., Adediran, A. O., & Bassey, M. A. (2023). A research landscape bibliometric analysis on climate change for last decades: Evidence from applications of machine learning. *Heliyon*, 9(10), e20297. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20297>
- Balasundram, S. K., Shamshiri, R. R., Sridhara, S., & Rizan, N. (2023). The Role of Digital Agriculture in Mitigating Climate Change and Ensuring Food Security: An Overview. *Sustainability*, 15(6), 5325. <https://doi.org/10.3390/su15065325>
- Bamal, A., Uddin, M. G., & Olbert, A. I. (2024). Harnessing machine learning for assessing climate change influences on groundwater resources: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(17), e37073. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37073>
- Bao, N., Peng, K., Yan, X., Lu, Y., Liu, M., Li, C., & Zhao, B. (2024). Towards interpreting machine learning models for understanding the relationship between vegetation growth and climate factors: A case study of the Anhui Province, China. *Ecological Indicators*, 167, 112636. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112636>
- Barredo Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-Lopez, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, 82–115. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
- Bochenek, B., & Ustrnul, Z. (2022). Machine Learning in Weather Prediction and Climate Analyses—Applications and Perspectives. *Atmosphere*, 13(2), 180. <https://doi.org/10.3390/atmos13020180>
- Crane-Droesch, A. (2018). Machine learning methods for crop yield prediction and climate change impact assessment in agriculture. *Environmental Research Letters*, 13(11), 114003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae159>
- Grenier, M., Boudreault, J., Raymond, S., & Boudreault, M. (2024). Projected seasonal flooding in Canada under climate change with statistical and machine learning. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101754. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101754>
- He, Y., Wang, G., Ren, Y., Gao, S., Chu, D., & McKirdy, S. J. (2024). Machine learning ensemble model prediction of northward shift in potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* and *G. pallida*) distribution under climate change conditions. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(10), 3576–3591. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.08.001>

- Helm, J. M., Swiergosz, A. M., Haeberle, H. S., Karnuta, J. M., Schaffer, J. L., Krebs, V. E., Spitzer, A. I., & Ramkumar, P. N. (2020). Machine Learning and Artificial Intelligence: Definitions, Applications, and Future Directions. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 13(1), 69–76. <https://doi.org/10.1007/s12178-020-09600-8>
- Jain, H., Dhupper, R., Shrivastava, A., Kumar, D., & Kumari, M. (2023). Leveraging machine learning algorithms for improved disaster preparedness and response through accurate weather pattern and natural disaster prediction. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1194918>
- Khuriyati, N., Guritno, A. D., Kurniawan, M. P., Hidayah, N., & Hendry, J. (2023). Dissemination of SDGs 4, 9, 13 through Strengthening Curriculum for Senior Vocational High Schools. *Proceedings of the 3rd International Conference on Community Engagement and Education for Sustainable Development*, October 2023, 225–234. <https://doi.org/10.21467/proceedings.151.32>
- Kolevatova, A., Riegler, M. A., Cherubini, F., Hu, X., & Hammer, H. L. (2021). Unraveling the Impact of Land Cover Changes on Climate Using Machine Learning and Explainable Artificial Intelligence. *Big Data and Cognitive Computing*, 5(4), 55. <https://doi.org/10.3390/bdcc5040055>
- Kushwaha, N. L., Sushanth, K., Patel, A., Kisi, O., Ahmed, A., & Abd-Elaty, I. (2024). Beach nourishment for coastal aquifers impacted by climate change and population growth using machine learning approaches. *Journal of Environmental Management*, 370, 122535. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122535>
- Leal Filho, W., Wall, T., Rui Mucova, S. A., Nagy, G. J., Balogun, A.-L., Luetz, J. M., Ng, A. W., Kovaleva, M., Safiul Azam, F. M., Alves, F., Guevara, Z., Matandirotya, N. R., Skouloudis, A., Tzachor, A., Malakar, K., & Gandhi, O. (2022). Deploying artificial intelligence for climate change adaptation. *Technological Forecasting and Social Change*, 180, 121662. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121662>
- Ma, Z., Awan, M. B., Lu, M., Li, S., Aziz, M. S., Zhou, X., Du, H., Sha, X., & Li, Y. (2023). An Overview of Emerging and Sustainable Technologies for Increased Energy Efficiency and Carbon Emission Mitigation in Buildings. *Buildings*, 13(10), 2658. <https://doi.org/10.3390/buildings13102658>
- Mahdizadeh Gharakhanlou, N., & Perez, L. (2024). From data to harvest: Leveraging ensemble machine learning for enhanced crop yield predictions across Canada amidst climate change. *Science of The Total Environment*, 951, 175764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175764>
- Miglani, A., & Kumar, N. (2019). Deep learning models for traffic flow prediction in autonomous vehicles: A review, solutions, and challenges. *Vehicular Communications*, 20, 100184. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2019.100184>
- Moradian, S., Iglesias, G., Broderick, C., & Olbert, I. A. (2023). Assessing the impacts of climate change on precipitation through a hybrid method of machine learning and discrete wavelet transform techniques, case study: Cork, Ireland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49, 101523. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101523>
- Papakyriakou, A., Bigtashi, A., & Lee, B. (2024). Evaluating the applicability of a machine learning methodology to improve TMY weather file generation for different Canadian climate zones. *Journal of Building Engineering*, 95, 110096. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110096>
- Raihan, A. (2023). Artificial intelligence and machine learning applications in forest management and biodiversity conservation. *Natural Resources Conservation and Research*, 6(2), 3825. <https://doi.org/10.24294/nrcr.v6i2.3825>
- Rifath, A. R., Muktedir, M. G., Hasan, M., & Islam, M. A. (2024). Flash flood prediction modeling in the hilly regions of Southeastern Bangladesh: A machine learning attempt on present and future climate scenarios. *Environmental Challenges*, 17, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101029>
- Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Luccioni, A. S., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Mukkavilli, S. K., Kording, K. P., Gomes, C. P., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., ... Bengio, Y.

- (2023). Tackling Climate Change with Machine Learning. *ACM Computing Surveys*, 55(2), 1–96. <https://doi.org/10.1145/3485128>
- Sahoo, S., Singha, C., & Govind, A. (2024). Advanced prediction of rice yield gaps under climate uncertainty using machine learning techniques in Eastern India. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101424. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101424>
- Salcedo-Sanz, S., Ghamisi, P., Piles, M., Werner, M., Cuadra, L., Moreno-Martínez, A., Izquierdo-Verdiguier, E., Muñoz-Mari, J., Mosavi, A., & Camps-Valls, G. (2020). Machine learning information fusion in Earth observation: A comprehensive review of methods, applications and data sources. *Information Fusion*, 63, 256–272. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.07.004>
- Sharma, V. (2020). Exploring the Predictive Power of Machine Learning for Energy Consumption in Buildings. *Journal of Technological Innovations*, 3(1). <https://doi.org/10.93153/Osvkc562>
- Shivaprakash, K. N., Swami, N., Mysorekar, S., Arora, R., Gangadharan, A., Vohra, K., Jadeyegowda, M., & Kiesecker, J. M. (2022). Potential for Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) Applications in Biodiversity Conservation, Managing Forests, and Related Services in India. *Sustainability*, 14(12), 7154. <https://doi.org/10.3390/su14127154>
- Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. *Annual Review of Psychology*, 70(1), 747–770. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>
- Subramaniam, R. K., Samuel, S. D., Seera, M., & Alam, N. (2024). Utilising machine learning for corporate social responsibility (CSR) and environmental, social, and governance (ESG) evaluation: Transitioning from committees to climate. *Sustainable Futures*, 8, 100329. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100329>
- Tang, K. (2024). Climate change education in Indonesia's formal education: a policy analysis. *Npj Climate Action*, 3(1), 57. <https://doi.org/10.1038/s44168-024-00143-z>
- Wen, H., Hu, K., Nghiem, X.-H., & Acheampong, A. O. (2024). Urban climate adaptability and green total-factor productivity: Evidence from double dual machine learning and differences-in-differences techniques. *Journal of Environmental Management*, 350, 119588. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119588>
- Xiao, F., Zhang, Z., Wu, Z., He, W., & Li, J. (2024). Machine learning-based climate zoning and asphalt selection for pavement infrastructure under changing climate: A focused study of Ningxia, China. *International Journal of Transportation Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.10.001>
- Yang, J., Ahn, D., Bahk, J., Park, S., Rizqihandari, N., & Cha, M. (2024). Assessing climate risks from satellite imagery with machine learning: A case study of flood risks in Jakarta. *Climate Risk Management*, 46, 100651. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100651>
- Zennaro, F., Furlan, E., Simeoni, C., Torresan, S., Aslan, S., Critto, A., & Marcomini, A. (2021). Exploring machine learning potential for climate change risk assessment. *Earth-Science Reviews*, 220, 103752. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103752>
- Zhang, X., Zhang, Z., Liu, Y., Xu, Z., & Qu, X. (2024). A review of machine learning approaches for electric vehicle energy consumption modelling in urban transportation. *Renewable Energy*, 234, 121243. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121243>
- Zhong, C., Li, L., & Wang, Y.-Z. (2024). Applications of chemical fingerprints and machine learning in plant ecology: Recent progress and future perspectives. *Microchemical Journal*, 206, 111447. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111447>