


Quantum Machine Learning Untuk Prediksi Emisi Gas Rumah Kaca dalam Perspektif Filsafat Sains

Wahyu Hidayat^{1,5}, Kridanto Surendro², Dimitri Mahayana³, Yusep Rosmansyah⁴
^{1,2,3,4} Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
⁵Fakultas Ilmu Terapan, Universitas Telkom, Bandung, Indonesia
E-mail: 33223004@std.stei.ac.id^{1,5}, endro@itb.ac.id², dimitri@lskk.ee.itb.ac.id³,
yusep@stei.itb.ac.id⁴

	<i>This is an open-access article under the CC BY-SA license. Copyright © XXXX by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.</i>	
Diterima: 18-12-2023	Direview: 12-01-2024	Publikasi: 30-06-2024

Abstrak

Isu perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca dan lahirnya teknologi *quantum machine learning* memunculkan berbagai penelitian tentang pemanfaatan *quantum machine learning* (QML) untuk memprediksi emisi gas rumah kaca (GRK). Artikel ini bertujuan untuk menjelaskan penelitian terkait implementasi QML untuk prediksi emisi GRK dari sudut pandang filsafat sains, terutama dalam hal revolusi sains dari perspektif Thomas Kuhn, analisis *research program* dari perspektif Imre Lakatos, jebakan pseudosains serta potensi bias ketidakadilan, aspek etis, moralitas, dan dampaknya bagi masyarakat. Penyusunan artikel ini menggunakan metode kualitatif deskriptif. Sumber referensi berupa artikel orisinal dan artikel review dari jurnal yang dikumpulkan dari database Scopus dengan topik terkait prediksi emisi GRK. Berdasarkan telaah artikel yang dilakukan, dapat diuraikan bahwa penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK merupakan *progressive science* yang sedang berada dalam fase eksplorasi dan pengembangan intensif di mana paradigma penelitian di area ini didominasi oleh positivisme logis dan pragmatisme, namun seiring berjalannya waktu dan berkembangnya konteks penelitian maka paradigma baru dapat muncul sebagai tambahan atau bahkan menggeser paradigma penelitian yang telah ada sebelumnya. Artikel ini juga mengidentifikasi potensi bias ketidakadilan, aspek etis, moralitas, dan dampak penelitian di bidang ini bagi masyarakat serta merekomendasikan 5 strategi untuk menghindari jebakan pseudosains terkait dengan penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK.

Kata Kunci: *quantum machine learning*; emisi gas rumah kaca; Thomas Kuhn; Imre Lakatos

Abstract

The climate change issues due to greenhouse gas emissions and the emergence of Quantum Machine Learning technology have sparked various studies in utilizing quantum machine learning (QML) to predict greenhouse gas emissions (GHG). This article aims to illustrate research related to the implementation of QML for GHG emission prediction from the perspective of the philosophy of science, particularly in terms of the scientific revolution from Thomas Kuhn's perspective, research program analysis from Imre Lakatos' perspective, pseudoscience pitfalls, potential biases of injustice, ethical and moral aspects, and their impact on society. The article is structured using a qualitative descriptive method. Reference sources include original articles and review articles from journals collected from the Scopus database with topics related to GHG emission prediction. Based on the review of the articles, it can be outlined that research on QML for GHG emission prediction is a progressive science currently in the phase of intensive exploration and development, where the research paradigm in this area is dominated by logical positivism and pragmatism. However, over time and with the development of the research context, new paradigms may emerge as additions or even replace existing research paradigms. The article also identifies the potential biases of injustice, ethical and moral aspects, and the impact of research in this field on society, recommending five strategies to avoid pseudoscience pitfalls related to research on QML for GHG emission prediction.

Keywords: quantum machine learning; greenhouse gas emissions; Thomas Kuhn; Imre Lakatos

1. Pendahuluan

Isu perubahan iklim akibat emisi gas rumah kaca dan dampaknya yang semakin nyata telah memaksa dunia untuk mencari solusi inovatif. Salah satu solusi yang mendapat sorotan adalah pemanfaatan teknologi *quantum machine learning* (QML) untuk memprediksi emisi gas rumah kaca (GRK). Penelitian tentang pemanfaatan teknologi QML untuk memprediksi emisi GRK memerlukan pandangan filsafat sains sebagai pondasi untuk memahami dan meletakkan landasan teoretis, mengidentifikasi permasalahan, tujuan dan metode penelitian sampai menarik kesimpulan hasil penelitian. Oleh karena itu, artikel ini memusatkan perhatian pada penerapan QML sebagai alat prediktif dalam konteks emisi GRK ditinjau dari sudut pandang filsafat sains.

Pemanfaatan QML untuk memprediksi emisi GRK dapat dipandang sebagai sebuah revolusi dalam bidang sains yang perlu dievaluasi kemandiriannya. Paradigma lama yang mengandalkan metode klasik, terus digantikan oleh pendekatan kuantum yang menawarkan kemampuan komputasi yang jauh lebih besar. Filsafat sains memandang fenomena ini sebagai revolusi paradigmatis yang diuraikan oleh Thomas Kuhn. Sementara itu, Imre Lakatos, seorang filsuf sains, memberikan perspektif analisis *research program* yang dapat digunakan untuk mengevaluasi ketetapan dan kemandirian teori ilmiah yang melandasi pemanfaatan QML untuk memprediksi emisi GRK.

Selain itu, penelitian di bidang teknologi kuantum berpotensi terjebak dalam pseudosains jika diiringi klaim yang berlebihan atau kurangnya dasar ilmiah. Potensi jebakan pseudosains memunculkan kebutuhan formulasi strategi penerapan prinsip-prinsip ilmiah untuk menghindari jebakan pseudosains dalam implementasi QML untuk meramalkan emisi GRK. Strategi ini perlu didukung oleh penerapan metode penelitian yang tepat yang didukung oleh pemahaman yang kuat tentang emisi GRK, terutama pada aspek ontologi, epistemologi, dan aksiologi yang penting dalam membentuk dasar filosofis yang kokoh. Aspek-etis dan moralitas juga perlu diperhatikan karena dampaknya yang luas terhadap masyarakat dan lingkungan. Identifikasi potensi bias dan keterkaitan dengan aspek ideologi, politik, ekonomi, lingkungan, sosial budaya dan pertahanan keamanan di NKRI juga perlu dilakukan agar setiap pemangku kepentingan menyadari peran strategis penelitian ini dalam konteks kehidupan bermasyarakat, berbangsa dan bernegara.

Oleh karena itu diperlukan adanya tinjauan menyeluruh dari perspektif filsafat sains terhadap penelitian di bidang pemanfaatan QML untuk memprediksi emisi GRK. Tinjauan ini meliputi tinjauan revolusi sains dari perspektif Thomas Kuhn, *research program* dari perspektif Imre Lakatos, analisis jebakan pseudosains, potensi bias ketidakadilan, aspek etis, moralitas, dan dampaknya bagi masyarakat. Analisis reflektif yang menyeluruh dari perspektif filsafat sains diharapkan akan mampu memberikan pondasi yang kuat bagi penelitian tentang pemanfaatan teknologi QML untuk memprediksi emisi GRK.

2. Metode

Artikel ini disusun dengan menerapkan metode pendekatan kualitatif deskriptif. Penulis menghimpun beberapa artikel yang terbit di berbagai jurnal di database Scopus. Pencarian dilakukan dengan mempertimbangkan artikel yang telah melalui proses "*peer review*" terkait dengan "*quantum machine learning*" dan "emisi gas rumah kaca". Untuk mengidentifikasi artikel-artikel yang relevan, beberapa kata kunci seperti "*greenhouse gas emissions*", "*carbon footprint*", "*carbon neutrality*", "*quantum machine learning*", "*classical quantum*", "*quantum inspired*" dan "*quantum enhanced*" digunakan secara bersamaan. Selain itu, beberapa filter diterapkan, yaitu rentang tahun publikasi 2019–2023, jenis dokumen "artikel" atau "review", tahap publikasi "final", jenis sumber "jurnal" atau "konferensi", dan artikel ditulis dalam bahasa Inggris.

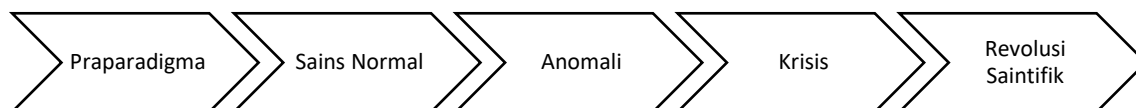
Setelah semua referensi terkumpul, kemudian dilakukan analisis terhadap isi artikel dan pembahasan komprehensif terhadap aspek-aspek filsafat sains. Analisis yang dilakukan bersifat reflektif. Interpretasi dan refleksi mendalam menggunakan konsep revolusi sains dari perspektif Thomas Kuhn dan *research program* dari perspektif Imre Lakatos dilakukan terhadap semua referensi yang terkumpul. Selain itu evaluasi terhadap nilai-nilai etis, pertimbangan moral, potensi bias ketidakadilan dan jebakan pseudosains juga dilakukan terhadap referensi-referensi tersebut. Hal ini bertujuan untuk mempertimbangkan dan menyajikan aspek-aspek filsafat sains secara komprehensif, meliputi revolusi sains dari perspektif Thomas Kuhn, *research program* dari perspektif Imre Lakatos, jebakan pseudosains, potensi bias, aspek etis, moralitas, dan dampak penelitian tentang penerapan QML untuk prediksi emisi GRK bagi masyarakat.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian terkait implementasi QML untuk prediksi emisi GRK dapat ditinjau secara komprehensif dari sudut pandang filsafat sains. Tinjauan ini dilakukan terutama terkait dengan revolusi sains dari perspektif Thomas Kuhn, *research program* dari perspektif Imre Lakatos, jebakan pseudosains, serta potensi bias ketidakadilan, aspek etis, moralitas, dan dampaknya bagi masyarakat.

a. Perspektif Thomas Kuhn: Revolusi dan Dinamika Sains QML untuk prediksi emisi GRK

Konsep revolusi sains diperkenalkan pertama kali oleh Thomas Samuel Kuhn. Revolusi Sains menyatakan bahwa sains berkembang secara revolusioner dan bukan secara kumulatif (Kuhn, 1962). Kuhn juga berpendapat bahwa sains tidak pernah 100% obyektif dan selalu ada celah ketidakobjektifan sains. Gambar 1 menunjukkan perkembangan sains dalam revolusi sains melalui 5 tahap yaitu praparadigma, sains normal, anomali, krisis dan revolusi saintifik (Mahayana, 2023).



Gambar 1. Revolusi Sains (Mahayana, 2023)

Dalam tahap pra-paradigma, penelitian terjadi tanpa tujuan dan arah yang jelas, dengan berbagai komunitas yang saling bersaing tanpa konsensus ilmiah. Suatu aliran pemikiran kemudian muncul sebagai dominan, menjanjikan solusi lebih maju. Sains normal datang ketika paradigma dominan diterima oleh komunitas ilmiah, menjadi kerangka kerja umum. Ada kalanya ketidaksesuaian dengan fenomena baru memicu anomali, menyebabkan keraguan terhadap paradigma yang dominan. Krisis muncul ketika paradigma dominan semakin diragukan, mendorong pencarian paradigma baru yang lebih inklusif. Sains normal ditinggalkan saat paradigma diuji ulang, dan perubahan besar terjadi melalui revolusi sains, menggantikan paradigma lama setelah uji coba, perdebatan ilmiah, dan pengakuan komunitas ilmiah terhadap keunggulan paradigma baru (Kuhn, 1962).

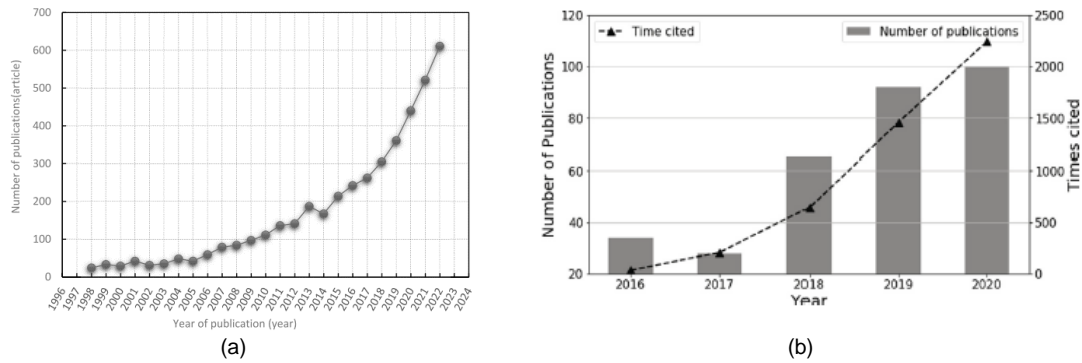
Secara historis, perkembangan teknik untuk memprediksi emisi GRK terus berkembang dan dapat dibagi menjadi 3 kategori pendekatan. Pendekatan pertama adalah menggunakan pendekatan tradisional. Adapun pendekatan kedua adalah menggunakan pendekatan cerdas dengan *machine learning* klasik. Pendekatan ketiga adalah menggunakan pendekatan cerdas dengan *quantum machine learning (QML)*. Pendekatan ketiga merupakan cabang pengembangan lebih lanjut yang berjalan paralel dengan pendekatan kedua di mana sampai saat ini baik pendekatan cerdas menggunakan *machine learning* klasik maupun pendekatan cerdas menggunakan QML masih sama-sama digunakan.

1) Prediksi Emisi GRK dengan Pendekatan Tradisional

Prediksi emisi GRK dengan pendekatan tradisional adalah pendekatan yang menggunakan rumus empiris buatan dan algoritma berbasis model matematika. Pendekatan ini kurang terintegrasi dengan teknologi yang sedang berkembang saat ini, memiliki ketergantungan yang tinggi kepada manusia dan memiliki tingkat pembaruan yang lambat. Pendekatan tradisional dilakukan dengan cara menganalisis, memverifikasi, dan memodifikasi berbagai jenis data dengan menggunakan pengalaman manual dan metode analisis matematika untuk memperoleh fungsi prediksi yang sesuai. Oleh karena itu pendekatan ini menuntut pengalaman para peneliti, dan seringkali tidak cocok untuk memprediksi emisi GRK dengan memperhitungkan berbagai faktor yang kompleks.

2) Prediksi Emisi GRK dengan Pendekatan Cerdas *Machine Learning* Klasik

Prediksi emisi GRK dengan *machine learning* klasik dapat dilakukan melalui prediksi secara langsung (makroskopis) maupun melalui prediksi kebutuhan energi bangunan. Kebutuhan energi bangunan memiliki korelasi yang tinggi dengan emisi GRK mengingat konsumsi energi bangunan memegang porsi besar dan proses penyediaan energi untuk bangunan juga melibatkan proses yang menghasilkan emisi gas rumah kaca, bahkan 40% emisi gas rumah kaca dihasilkan oleh bangunan (Khalil et al., 2022). Perkembangan kedua area penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.



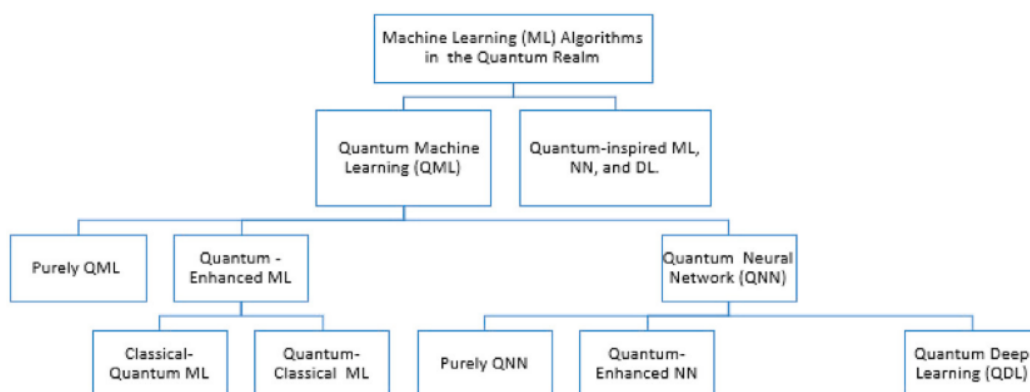
Gambar 2. Perkembangan Penelitian Prediksi Emisi GRK dengan *Machine Learning* Secara Makroskopis (Zhao et al., 2023) dan Melalui Prediksi Kebutuhan Energi Bangunan (Lu et al., 2022)

Ada lima model yang paling banyak digunakan untuk memprediksi emisi gas rumah kaca secara makroskopis dengan *machine learning* klasik yaitu Long Short Term Memory (LSTM), Back Propagation Neural Network (BPNN), Support Vector Machine (SVM), Extreme Learning Machine (ELM), dan Random Forest (RF). Prediksi emisi gas rumah kaca dengan *machine learning* biasanya menggunakan data tingkat perkembangan ekonomi (GDP), struktur industri, urbanisasi, jumlah penduduk, konsumsi energi, dan kemajuan teknologi atau kombinasinya (Zhao et al., 2023). Salah satu contoh penelitian yang sukses menerapkan prediksi emisi GRK di tingkat makroskopis adalah (Emami Javanmard & Ghaderi, 2022)

Adapun prediksi kebutuhan energi pada bangunan banyak dilakukan dengan menggunakan *artificial neural network* dengan 3 kelompok arsitektur yaitu FFNN, CNN dan RNN (Lu et al., 2022). Salah satu penelitian yang berhasil melakukan prediksi emisi GRK di tingkat bangunan adalah (Wang et al., 2023). Baik model prediksi karbon secara makroskopis maupun melalui prediksi kebutuhan energi pada bangunan telah banyak dioptimasi dengan berbagai teknik optimasi. Adapun teknik optimasi yang paling populer digunakan adalah berasal dari kelompok algoritma *swarm intelligence* (Lu et al., 2022; Zhao et al., 2023).

3) Prediksi Emisi GRK dengan Pendekatan Cerdas *Quantum Machine Learning*

Prediksi emisi GRK dengan *quantum machine learning* menggunakan 3 kategori pendekatan yaitu *hybrid classical-quantum*, *pure quantum machine learning*, dan *quantum-inspired algorithm* (Houssein et al., 2022). *Hybrid classical-quantum* merupakan pendekatan campuran di mana sebagian algoritma atau pemrosesan dilakukan dengan menggunakan komputer kuantum, sementara bagian lainnya tetap menggunakan komputer klasik. Adapun pada pendekatan *pure quantum machine learning*, semua aspek algoritma dan pemrosesan data dilakukan menggunakan komputer kuantum tanpa campur tangan dari komputer klasik. *Quantum inspired algorithm* merupakan sebuah pendekatan di mana algoritma tidak dijalankan pada komputer kuantum, tetapi algoritma tersebut terinspirasi dari mekanika kuantum dan dirancang untuk mencerminkan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Taksonomi QML dengan 3 pendekatan ini diilustrasikan pada gambar 3.



Gambar 3. Taksonomi QML (Houssein et al., 2022)

Berdasarkan uraian sebelumnya, maka dapat disimpulkan bahwa dari sudut pandang revolusi sains Thomas Kuhn, prediksi emisi GRK menggunakan QML dapat dikategorikan ke dalam fase "sains normal". Ada dua alasan yang menguatkan argumen ini, yaitu sebagai berikut.

- 1) Pendekatan QML untuk memperkirakan emisi GRK menggunakan kerangka kerja (*training, validation* dan *testing*) dan standar pengukuran performa (MAE, RMSE, MSE, MAPE, R2, dsb) yang sama dengan kerangka kerja dan standar yang digunakan pada *machine learning* klasik. Kerangka kerja dan standar tersebut telah diterima secara luas di kalangan komunitas ilmiah dalam bidang ini, menandakan adopsi yang luas dan konsensus di antara para peneliti.
- 2) Sejauh ini QML secara konsisten masih digunakan oleh para ilmuwan dan belum ditemukan adanya oposisi atau inkonsistensi yang signifikan yang mengarah pada pergeseran paradigma.

Namun demikian, pandangan bahwa prediksi emisi GRK menggunakan QML dapat dikategorikan ke dalam fase "sains normal" ini dapat berubah seiring waktu dan perkembangan terbaru di ranah penelitian, terutama jika ditemukan adanya anomali atau perbedaan yang tidak dapat dijelaskan oleh paradigma yang ada. Anomali ini dapat bertindak sebagai katalis untuk transisi menuju tahap krisis dan tahap potensi revolusi saintifik.

b. Perspektif Imre Lakatos: QML untuk prediksi emisi GRK sebagai Progressive Science

Menurut Imre Lakatos, "program penelitian" (*research program*) adalah kerangka teoritis di bidang sains yang mencakup sejumlah besar teori dan hipotesis. *Research program* ini biasanya memiliki "inti kokoh" (*hard core*) dan "sabuk pelindung" (*protective belt*) (Agassi, 2014). *Hard core* merupakan prinsip-prinsip dasar, teori esensial, atau keyakinan dasar yang membangun dasar-dasar paradigma atau *research program*. Gagasan dan konsep yang terkandung dalam *hard core* dianggap tidak berubah atau hampir tidak dapat dipertanyakan oleh para ilmuwan yang terlibat dalam *research program* ini. Adapun *protective belt* adalah lingkungan di sekitar *hard core* yang mencakup hipotesis tambahan, penyesuaian, atau asumsi yang sifatnya lebih mudah beradaptasi. *Protective belt* berfungsi sebagai pelindung untuk *hard core*, melindunginya dari kontradiksi atau inkonsistensi dengan data empiris yang mungkin timbul. Asumsi atau hipotesis di dalam *protective belt* lebih dapat dimodifikasi atau diperbaiki ketika dihadapkan dengan bukti baru, tanpa secara langsung merusak *hard core*.

1) *Hard Core*

QML merupakan *machine learning* yang terinspirasi atau menerapkan mekanika kuantum. Oleh karena itu mekanika kuantum merupakan salah satu teori yang menjadi *hard core* dalam *research program* QML untuk emisi GRK karena prinsip-prinsip mekanika kuantum merupakan fondasi utama dalam QML (Jadhav et al., 2023; Sood & Pooja, 2023; Valdez & Melin, 2023) yang tidak dapat diganggu gugat. Mekanika kuantum adalah cabang fisika teoretis yang menggambarkan perilaku materi pada skala super kecil, seperti partikel subatom seperti elektron dan foton. Dua konsep utama dalam mekanika kuantum yang dominan dalam QML adalah teori tentang *quantum superposition* dan *quantum entanglement* (Houssein et al., 2022; Yulianti & Surendro, 2022). *Quantum superposition* merupakan teori yang menyatakan bahwa sebuah *qubit* dapat berada dalam banyak *state* secara bersamaan, tidak seperti bit klasik yang hanya memiliki satu *state* 0 atau 1 dalam satu waktu (Houssein et al., 2022). Adapun *quantum entanglement* adalah sebuah teori yang menjelaskan fenomena di mana *qubit-qubit* dapat saling terkait (*entangled*) sehingga *state* satu *qubit* dapat diprediksi dari *state qubit* lainnya (Houssein et al., 2022).

QML menerapkan mekanika kuantum untuk meningkatkan kinerja *machine learning* klasik. Oleh karena itu teori-teori dasar tentang *machine learning* klasik dan teori tentang probabilitas dan statistik yang banyak digunakan dalam *machine learning* klasik juga merupakan salah satu inti keras (*hard core*) dari sebuah *research program* QML untuk Prediksi Emisi GRK. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa teori *quantum superposition, quantum entanglement*, teori mekanika kuantum secara umum serta teori dasar tentang *machine learning*, probabilitas dan statistik adalah merupakan *hard core* di mana teori-teori ini dianggap tidak berubah atau hampir tidak dapat dipertanyakan oleh para ilmuwan yang terlibat dalam *research program* QML.

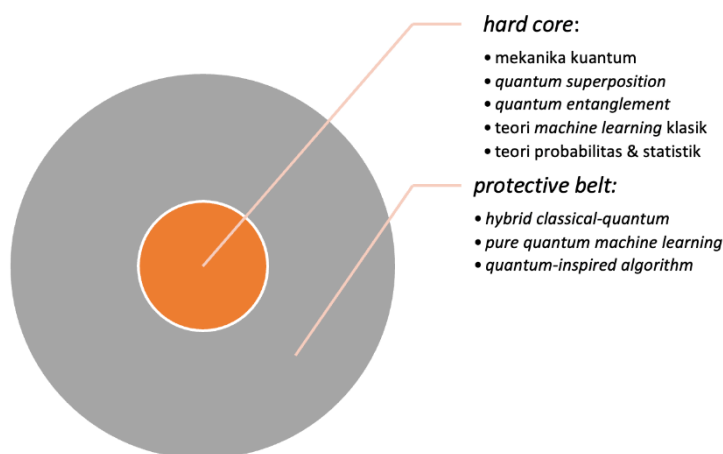
2) *Protective Belt*

Beberapa teori dianggap sebagai bagian dari *protective belt* berupa beberapa hipotesis tambahan, penyesuaian, atau asumsi yang sifatnya lebih mudah beradaptasi yang berfungsi sebagai pelindung untuk *hard core* dari kontradiksi atau inkonsistensi dengan data empiris yang mungkin timbul. Pada *research program* tentang QML beberapa teori yang menjadi bagian dari

protective belt adalah tiga kategori pendekatan *quantum machine learning* yaitu *hybrid classical-quantum*, *pure quantum machine learning*, dan *quantum-inspired algorithm* (Houssein et al., 2022). Ketiga pendekatan ini memiliki cara yang berbeda-beda, masih terus dikembangkan, dan menerima penyesuaian teori-teori yang lebih baru dan relevan. Adapun implementasi dari ketiga pendekatan ini telah banyak diteliti dalam (Houssein et al., 2022) dan (Jadhav et al., 2023), sedangkan potensi pengembangannya dengan *quantum annealing* diulas dalam (Yulianti & Surendro, 2022).

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tiga kategori pendekatan *quantum machine learning* yaitu *hybrid classical-quantum*, *pure quantum machine learning*, dan *quantum-inspired algorithm* adalah merupakan *protective belt* berupa beberapa pendekatan tambahan, penyesuaian, atau metode yang sifatnya lebih mudah beradaptasi yang berfungsi melindungi teori *quantum superposition*, *quantum entanglement*, teori mekanika kuantum secara umum serta teori dasar tentang *machine learning*, probabilitas dan statistik sebagai *hard core* dari kontradiksi atau inkonsistensi dengan data empiris yang mungkin timbul.

Gambar 4 menunjukkan identifikasi terhadap beberapa teori yang menjadi *hard core* dan *protective belt* dalam konteks *research program* QML untuk Prediksi Emisi GRK sebagai berikut:



Gambar 4. *Hard core* dan *Protective Belt* pada *Research Program* QML untuk Prediksi Emisi GRK

Lakatos berusaha untuk menunjukkan melalui pemanfaatan *hard core* dan *protective belt*, bahwa *research program* memiliki kemampuan untuk bertahan dan maju dengan cara mengakomodasi modifikasi pada *protective belt* tanpa mengubah prinsip-prinsip dasar yang membentuk *hard core* dari *research program* tersebut (Agassi, 2014). *Research program* dianggap progresif jika memiliki kapasitas untuk menghasilkan prediksi baru yang kemudian dibuktikan oleh bukti empiris, bahkan jika ini memerlukan modifikasi pada *protective belt*. Sebaliknya, program penelitian dianggap degeneratif jika mengalami kegagalan berulang dalam memprediksi fenomena baru atau merumuskan lebih banyak asumsi *ad hoc* untuk menjelaskan ketidaksesuaian dengan data.

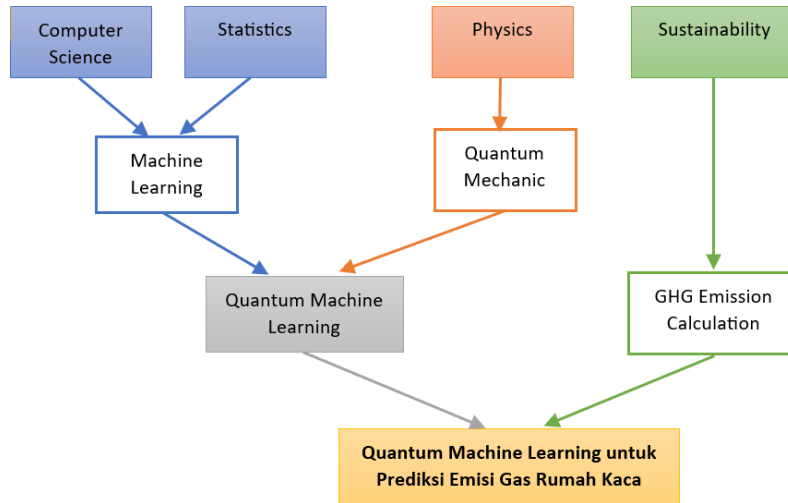
Penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK adalah sebuah *progressive research* karena penelitian ini memiliki kemampuan untuk mengembangkan teknik dan model prediksi emisi GRK yang dapat meningkatkan kemampuan *machine learning* klasik untuk memproses dan menganalisis data secara lebih efisien. Kemampuan ini telah didukung oleh bukti-bukti empiris dari berbagai hasil pengujian terhadap penerapannya. Teori mekanika kuantum secara umum serta teori dasar tentang *machine learning*, probabilitas dan statistik dipandang sebagai inti kokoh (*hard code*) yang tidak berubah atau hampir tidak dapat dipertanyakan. *Hard core* ini mendukung evolusi pendekatan *hybrid classical-quantum*, *pure quantum machine learning*, dan *quantum-inspired algorithm* sebagai sabuk pelindung (*protective belt*) yang terus berkembang.

c. Ontologi, Epistemologi, dan Aksiologi Penelitian QML untuk Prediksi Emisi GRK

Pada dasarnya, ontologi mempelajari hakikat keberadaan sesuatu yang ingin diketahui, epistemologi mempelajari bagaimana cara mendapatkan pengetahuan tentang hal yang ingin diketahui tersebut, sedangkan aksiologi akan menjelaskan tentang manfaat dari pengetahuan yang diperoleh tersebut.

1) Ontologi

Ontologi membahas pertanyaan-pertanyaan mendasar tentang keberadaan dan kenyataan. Sederhananya, ontologi mempelajari hakikat keberadaan sesuatu yang ingin diketahui (Mahayana, 2023). Ontologi tidak lepas dari bidang-bidang keilmuan yang menyusun atau menopang penelitian itu sendiri. Gambar 5 menunjukkan ontologi penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK.



Gambar 5. Ontologi Penelitian tentang Quantum *Machine Learning* untuk Prediksi Emisi GRK

Ontologi penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK ini mendeskripsikan pandangan filosofis tentang sifat realitas dan eksistensi yang menjadi dasar bagi penelitian tersebut di mana terdapat dua poin penting terkait ontologi. Pertama, penelitian ini memandang emisi gas rumah kaca sebagai sebuah realitas. Emisi gas rumah kaca dipandang sebagai sebuah entitas nyata yang dapat diukur secara objektif dengan pola dan perilaku yang dapat diukur dalam satuan ton equivalent CO₂. Kedua, penelitian ini akan lebih fokus pada kegunaan dan efektivitas suatu pendekatan daripada pada kebenaran mutlak. Hal ini adalah wajar dalam penelitian ini karena tidak ada model *machine learning* yang 100% benar, namun yang diharapkan adalah model *machine learning* yang dapat memberikan manfaat nyata yang sebesar-besarnya. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini mengambil pandangan yang kritis terhadap emisi gas rumah kaca, menganggapnya sebagai realitas yang dapat diukur dan diidentifikasi secara objektif. Pandangan ini membantu penelitian merinci dampaknya secara objektif. Penggunaan satuan ton equivalent CO₂ mempermudah pemahaman dan perbandingan, sehingga memberikan dasar yang kuat untuk analisis.

Pemahaman terhadap ontologi dari penelitian yang sedang dikerjakan adalah krusial. Ontologi mempelajari hakikat keberadaan sesuatu yang ingin diketahui, sehingga pemahaman yang benar tentang ontologi akan memastikan peneliti tidak salah memahami objek penelitian dan melakukan pendekatan yang tepat terhadap objek penelitian tersebut.

2) Epistemologi

Epistemologi adalah cabang filsafat yang mempertanyakan sumber, batas, dan validitas pengetahuan. Sederhananya, epistemologi mempelajari bagaimana cara mendapatkan pengetahuan tentang hal yang ingin diketahui (Mahayana, 2023). Epistemologi penelitian tentang Implementasi QML untuk prediksi emisi GRK memiliki dua poin. Pertama, penelitian ini menganut pendekatan positivis yang menekankan pada kegunaan sumber data empiris dari hasil percobaan dan eksperimen. Data dari eksperimen dianggap sebagai sumber pengetahuan yang valid dan dapat diandalkan untuk mendukung proses pemodelan *machine learning*. Pendekatan epistemologis yang diterapkan pada penelitian ini melibatkan observasi empiris dan validasi, dengan tujuan menghasilkan pengetahuan yang objektif, dapat diverifikasi, dan berlaku secara universal. Hal ini dilakukan dengan menggunakan desain kuantitatif untuk mengukur dan menguji hipotesis dengan cara yang terukur dan terverifikasi. misalnya mengukur akurasi hasil prediksi dengan besaran RMSE, MSE, MAE, MAPE, R² dan sebagainya. Data yang digunakan juga dikumpulkan secara sistematis dan mengikuti metode ilmiah yang baku untuk pengumpulan data. Kedua, walaupun penelitian ini mencakup positivisme dengan penekanan pada data empiris dan

deduktivisme dalam pengembangan model matematis *machine learning*, serta mengakui dimensi probabilitas (ketidakpastian), namun pendekatan epistemologis penelitian ini berfokus pada konsekuensi praktis dan utilitas pengetahuan, dengan menekankan dampak dunia nyata dari model *machine learning* yang dihasilkan dari penelitian ini.

Pemahaman terhadap epistemologi dari penelitian yang sedang dikerjakan adalah krusial. Epistemologi mempelajari bagaimana cara mendapatkan pengetahuan sehingga pemahaman tentang epistemologi yang benar akan memastikan peneliti memilih metode penelitian yang tepat untuk langkah-langkah penelitian mulai dari pengumpulan data sampai penarikan kesimpulan. Epistemologi memberikan gambaran komprehensif tentang cara peneliti memandang dan mendekati pembangunan pengetahuan dalam penelitian ini, serta membantu pembaca memahami landasan filosofis yang membentuk cara peneliti mendekati proses penelitian.

3) Aksiologi

Aksiologi berfokus pada studi nilai dan etika. Ini mencakup pertanyaan tentang apa yang dianggap baik atau buruk, indah atau jelek, dan bagaimana nilai-nilai ini membentuk perilaku dan keputusan manusia. Sederhananya, aksiologi akan menjelaskan tentang manfaat dan nilai-nilai yang terkait dengan pengetahuan yang diperoleh (Mahayana, 2023).

Aksiologi penelitian tentang Implementasi Quantum *Machine learning* untuk Prediksi Emisi Gas Rumah Kaca memiliki beberapa aspek dengan empat poin penting yang menjadi pertimbangan aksiologis. Pertama, mengedepankan nilai-nilai dan etika penelitian mendasari penelitian. Hal ini penting terutama mengenai aspek integritas. Aspek integritas perlu dijunjung tinggi baik dalam pemilihan data uji yang digunakan dan pengukuran efektivitas model *machine learning* yang dihasilkan. Kedua, ikut memperhitungkan tanggung jawab sosial, terutama terkait dengan dampaknya pada lingkungan, terutama terkait keberlanjutan atau kesejahteraan masyarakat. Hasil pengetahuan dari penelitian ini bisa digunakan oleh pengambil keputusan untuk membuat regulasi yang mungkin berdampak kepada kesejahteraan masyarakat, misalnya memperluas atau mempersempit lapangan kerja tertentu berdasarkan pertimbangan emisi gas rumah kaca. Ketiga, melindungi privasi dan keamanan data. Untuk memprediksi emisi gas rumah kaca digunakan data-data yang mungkin saja bersifat sensitif. Perlu ada langkah-langkah yang diambil untuk melindungi privasi dan keamanan data yang digunakan dalam penelitian serta jaminan bahwa data yang dikumpulkan dan digunakan dengan itikad baik dan sesuai dengan norma etika yang berlaku. Keempat, menjaga integritas ilmiah dalam seluruh proses penelitian, termasuk publikasi temuan. Hasil penelitian yang dipublikasikan seyogianya memenuhi syarat yang ketat dan memiliki akuntabilitas dalam penyajiannya.

Pemahaman terhadap aksiologi dari penelitian yang sedang dikerjakan adalah krusial. Aksiologi akan menjelaskan tentang manfaat dan nilai-nilai yang terkait dengan pengetahuan yang diperoleh, sehingga pemahaman yang baik akan aksiologi penelitian akan memastikan hasil penelitian bernilai guna positif dan menjamin kepercayaan komunitas ilmiah dan masyarakat terhadap integritas dan dampak positif dari penelitian.

d. Paradigma Penelitian QML untuk Prediksi Emisi GRK

Topik penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK memiliki beberapa sudut pandang yang beragam dan dapat dipandang dari beberapa paradigma yang berbeda-beda. Ada banyak paradigma, lima diantaranya yang populer adalah positivisme logis, realisme kritis, interpretivism, postmodern dan pragmatisme (Mahayana, 2023). Pada penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK ada 2 paradigma yang dominan yaitu positivisme logis dan pragmatisme.

Jika ditinjau dari perspektif ontologi positivisme logis, maka penelitian ini memandang emisi gas rumah kaca sebagai entitas nyata dengan pola dan perilaku yang dapat diukur. Pendekatan epistemologis yang diterapkan pada penelitian ini melibatkan observasi empiris dan validasi, dengan tujuan menghasilkan pengetahuan yang objektif, dapat diverifikasi, dan berlaku secara universal. Secara aksiologis, nilai-nilai penelitian ini turut pula mempertimbangkan objektivitas, presisi, dan netralitas pengukuran emisi gas rumah kaca. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan bias agar memunculkan informasi yang dapat diandalkan terkait emisi gas rumah kaca.

Jika ditinjau dari sudut pandang ontologi pragmatisme, maka penelitian ini akan lebih fokus pada kegunaan dan efektivitas suatu pendekatan daripada pada kebenaran mutlak. Hal ini adalah wajar dalam penelitian ini karena tidak ada model *machine learning* yang 100% benar, namun yang diharapkan adalah model *machine learning* yang dapat memberikan manfaat nyata yang sebesar-besarnya. Pendekatan epistemologis penelitian ini berfokus pada konsekuensi praktis dan utilitas pengetahuan, dengan menekankan dampak dunia nyata dari model *machine learning*

yang dihasilkan dari penelitian ini. Secara aksiologis, nilai-nilai dalam penelitian ini mempertimbangkan prioritas pada hasil praktis dan efektivitas, dengan penekanan pada solusi yang efektif dan memberikan manfaat nyata dalam mengatasi tantangan emisi gas rumah kaca.

Selain kedua paradigma tersebut, seiring berjalannya waktu dan berkembangnya konteks penelitian, tidak menutup kemungkinan ada paradigma lain yang dapat digunakan dalam memandang penelitian ini. Hal ini tidak mustahil karena pada dasarnya paradigma penelitian memberikan gambaran tentang landasan filosofis dan metodologis yang membentuk pendekatan penelitian itu sendiri.

e. **Jebakan Pseudosains dalam Penelitian QML untuk Prediksi Emisi GRK**

Pseudosains merujuk pada klaim atau pengetahuan yang tidak didukung oleh metode ilmiah yang kredibel atau bukti empiris yang dapat diverifikasi. Salah satu definisi formal lain tentang pseudosains adalah klaim atau praktek yang diakui sebagai ilmiah, tetapi sebenarnya tidak mematuhi metode ilmiah atau tidak memiliki dasar ilmiah yang kuat (Mahayana, 2023). Setiap topik penelitian perlu berhati-hati terhadap jebakan pseudosains karena beberapa alasan:

- 1) Penelitian tentang teknologi canggih seperti QML seringkali menciptakan harapan yang tinggi, sehingga rentan terhadap klaim berlebihan atau ekspektasi yang tidak realistis jika tidak didukung oleh metodologi ilmiah yang kuat dan bukti empiris yang valid.
- 2) Kesalahan atau klaim yang tidak berdasar terhadap masalah lingkungan seperti prediksi emisi gas rumah kaca, dapat memiliki konsekuensi serius. Kebijakan yang dibuat berdasarkan hasil penelitian yang tidak dapat dipercaya dapat mengarah pada pengambilan keputusan yang buruk dan bahkan dapat merugikan lingkungan.
- 3) Keberhasilan penerapan QML untuk prediksi emisi gas rumah kaca bergantung pada penerimaan pemangku kepentingan. Jebakan pseudosains dapat merusak citra teknologi ini di mata masyarakat jika klaim yang dibuat tidak dapat diverifikasi atau terbukti salah.

Kemampuan mengidentifikasi pseudosains begitu penting agar peneliti dapat menghindari jebakan pseudosains. Berikut ini adalah beberapa strategi untuk mengidentifikasi pseudosains dalam konteks penelitian QML untuk prediksi emisi GRK:

- 1) Memastikan bahwa langkah-langkah pembangunan model QML dapat direplikasi (dilakukan ulang). Jika langkah-langkah dalam penelitian tidak cukup detail untuk dapat direplikasi atau dilakukan ulang, maka ini dapat menjadi salah satu indikasi pseudosains.
- 2) Memastikan bahwa klaim atau teori didukung oleh bukti ilmiah yang dapat diverifikasi oleh penelitian independen. Dalam konteks QML, hal ini dilakukan dengan memastikan bahwa model prediksi diuji dengan dataset yang cukup dan diukur dengan besaran yang jelas dan terukur. Penelitian yang menyajikan klaim atau teori yang tidak didukung oleh bukti ilmiah yang dapat diverifikasi maka dapat dicurigai sebagai pseudosains.
- 3) Memeriksa metodologi yang digunakan dalam pengembangan model QML. Penelitian yang belum menggunakan metode ilmiah yang ketat dapat dicurigai sebagai pseudosains.
- 4) Memeriksa klaim yang terlalu fantastis, misalnya ada klaim bahwa model QML yang dihasilkan memiliki akurasi 100% dengan error sebesar 0 dan dapat diterapkan untuk berbagai kasus. Jika ada klaim seperti ini maka dapat dicurigai sebagai pseudosains.

Keempat strategi ini perlu diterapkan untuk memastikan bahwa penelitian tentang penggunaan QML untuk prediksi emisi gas rumah kaca berada pada dasar pengetahuan yang kokoh dan terhindar dari masuk ke dalam domain pseudosains.

f. **Potensi Bias Ketidakadilan, Aspek Etis, Moralitas, dan Dampak bagi Masyarakat**

Penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK berpotensi memunculkan beberapa jenis bias yang dapat mempengaruhi objektivitas dari hasil penelitian tersebut. Pemahaman terhadap potensi bias ini penting agar dapat diformulasikan langkah-langkah pencegahan untuk memastikan agar hasil penelitian tetap objektif dan adil. Potensi bias dapat muncul dari beberapa faktor berikut ini:

- 1) **Data yang tidak representatif.** Proses pelatihan model prediksi emisi GRK dengan QML memerlukan data yang diambil dari populasi. Jika teknik *data sampling* yang digunakan tidak tepat, maka ada kemungkinan sebagian elemen populasi kurang terwakili sehingga model yang dihasilkan menjadi bias dan tidak objektif.
- 2) **Pemilihan fitur yang tidak tepat.** Prediksi emisi GRK dapat dilakukan dengan melatih model QML untuk mempertimbangkan berbagai faktor. Jika pemilihan faktor tidak tepat atau memiliki implikasi ketidaksetaraan, misalnya terdapat variabel yang lebih relevan untuk kelompok-kelompok tertentu maka model yang dihasilkan juga menjadi bias.

3) **Transparansi, interpretabilitas, dan akuntabilitas algoritma *machine learning*.** Algoritma QML memiliki karakteristik yang beragam dan cara kerja yang beragam pula dalam memahami pola berdasarkan data. Beberapa model dinilai memiliki aspek transparansi dan interpretabilitas yang lebih baik sehingga dianggap lebih akuntabel dan lebih mudah dipahami sehingga keputusan yang dihasilkan dari model-model tersebut dinilai lebih dapat dipertanggungjawabkan dan mengandung resiko bias yang lebih kecil.

Selain potensi bias yang mengancam objektivitas penelitian, beberapa aspek etis dan moralitas juga perlu diperhatikan agar memastikan bahwa penelitian ini tidak melanggar etika dan norma yang berlaku, beberapa di antaranya, yaitu sebagai berikut.

- 1) **Kerahasiaan dan keamanan data.** Banyak penelitian tentang prediksi emisi GRK menggunakan data-data sensitif terkait dengan kondisi ekonomi, pendidikan, konsumsi energi maupun kebiasaan dan perilaku individu atau kelompok individu. Data-data sensitif ini perlu dilindungi dengan prosedur pengamanan data yang tepat untuk melindungi kerahasiaan dan keamanannya sebagai bentuk tanggung jawab moral penelitian.
- 2) **Keadilan dan keterwakilan.** Dalam penelitian tentang prediksi emisi GRK seringkali dilakukan *sampling* pengambilan data dari sekelompok populasi. Teknik *sampling* yang digunakan idealnya menjamin tiap elemen dan kelompok dalam populasi terwakili secara adil. Teknik *sampling* yang tepat akan menjamin data sampel yang digunakan untuk proses *training* benar-benar mewakili kondisi nyata di lapangan sehingga model prediksi yang dihasilkan lebih proporsional dan tidak condong kepada pihak tertentu.
- 3) **Akuntabilitas dan transparansi algoritma.** Ada beberapa pilihan algoritma yang dapat digunakan untuk memprediksi emisi GRK. Beberapa algoritma memiliki aspek *explainability* yang lebih baik daripada algoritma yang lain. Hal ini menyebabkan model-model yang memiliki aspek *explainability* lebih baik akan dinilai lebih akuntabel karena polanya lebih mudah dipahami dan dijelaskan sehingga keputusan yang dihasilkan dari model-model tersebut dinilai lebih dapat dipertanggungjawabkan.
- 4) **Dampak lingkungan.** Penggunaan teknologi *quantum* dan *machine learning* membutuhkan sumber daya komputasi dan energi yang tinggi sehingga implementasinya dapat memiliki dampak lingkungan yang cukup signifikan. Penggunaan teknologi ini perlu dievaluasi dan diefisienkan sehingga manfaat yang dihadirkan jauh mengungguli efek negatif dari sumberdaya yang digunakan.
- 5) **Keterbukaan ilmiah.** Masyarakat perlu memiliki akses terhadap temuan hasil penelitian, baik dalam bentuk publikasi hasil penelitian maupun purwarupa hasil penelitian. Peneliti juga sebaiknya siap atas sanggahan atau peluang temuannya di-falsifikasi.

Setelah memastikan penelitian bebas dari bias dan tetap etis, para peneliti di bidang QML untuk prediksi emisi GRK juga perlu mengidentifikasi, memetakan dan menyadari peran penting topik penelitiannya dengan berbagai aspek ideologi, politik, sosial, budaya, pertahanan, dan keamanan negara Republik Indonesia.

- 1) **Aspek ideologi.** Penelitian ini secara langsung berperan dalam usaha pembangunan yang berkelanjutan dan keberlangsungan lingkungan hidup, di mana hal ini adalah cerminan dan implementasi dari ideologi Pancasila, utamanya sila ke lima, yaitu keadilan sosial bagi seluruh rakyat Indonesia.
- 2) **Aspek politik.** Dukungan pemerintah terhadap penelitian ini dapat menunjukkan keterlibatan dan komitmen politik pemerintah terhadap isu lingkungan.
- 3) **Aspek ekonomi.** Temuan dari penelitian QML dapat memberikan dasar yang kuat untuk penyusunan kebijakan ekonomi yang berfokus pada pengurangan emisi GRK dan mendorong transformasi ekonomi menuju model yang lebih ramah lingkungan.
- 4) **Aspek sosial dan budaya.** Hasil penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK diharapkan dapat menggugah kesadaran masyarakat akan pentingnya isu lingkungan, yang pada akhirnya akan mengubah perilaku masyarakat dalam upaya menjaga lingkungan, terutama terkait dengan kearifan-kearifan lokal yang berlaku di masyarakat daerah tertentu yang menyesuaikan dengan kondisi geografis alam sekitarnya.
- 5) **Aspek pertahanan dan keamanan.** Penelitian ini erat kaitannya dengan peran upaya mitigasi perubahan iklim untuk menanggulangi ancaman terhadap keamanan negara akibat dari efek buruk perubahan iklim yang menyebabkan perubahan ketersediaan sumber daya alam, ketahanan pangan dan kestabilan regional.

Satu hal yang penting untuk dipahami adalah bahwa dampak dan keterkaitan penelitian dengan aspek-aspek tersebut dipengaruhi oleh hasil konkret penelitian dan membutuhkan kolaborasi antara pemerintah, peneliti, dan pihak-pihak terkait lainnya.

4. Simpulan dan Saran

Jika ditinjau dari sudut pandang revolusi sains Thomas Kuhn, prediksi emisi GRK menggunakan QML dapat dikategorikan ke dalam fase "sains normal". Ada dua argumen yang menguatkan argumen ini. Argumen pertama karena pendekatan QML untuk memperkirakan emisi GRK menggunakan kerangka kerja dan standar pengukuran performa yang sama dengan kerangka kerja dan standar yang digunakan pada *machine learning* klasik yang telah diterima secara luas di kalangan komunitas ilmiah dalam bidang ini. Adapun alasan kedua karena sejauh ini belum ditemukan adanya oposisi atau inkonsistensi yang signifikan yang mengarah pada pergeseran paradigma pada QML. Padangan ini suatu saat kelak dapat berubah jika ditemukan adanya anomali atau perbedaan yang tidak dapat dijelaskan oleh paradigma yang ada sehingga dapat bertindak sebagai katalis untuk transisi menuju tahap krisis dan tahap potensi revolusi saintifik.

Jika ditinjau dari sudut pandang *research program* Imre Lakatos, penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK adalah sebuah *progressive research*. Penelitian ini memiliki kemampuan untuk mengembangkan teknik dan model prediksi emisi GRK yang dapat meningkatkan kemampuan *machine learning* klasik untuk memproses dan menganalisis data secara lebih efisien melalui pendekatan *hybrid classical-quantum*, *pure quantum machine learning*, dan *quantum-inspired algorithm* dengan didukung oleh bukti-bukti empiris dari berbagai hasil pengujian terhadap penerapannya.

Pemahaman terhadap ontologi, epistemologi, dan aksiologi dari penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK adalah krusial. Pemahaman yang benar tentang ontologi akan memastikan peneliti tidak salah memahami emisi GRK dan melakukan pendekatan yang tepat terhadap emisi GRK tersebut. Pemahaman tentang epistemologi yang benar akan memastikan peneliti memilih metode penelitian yang tepat untuk langkah-langkah penelitian mulai dari pengumpulan data sampai penarikan kesimpulan. Pemahaman yang baik akan aksiologi penelitian akan memastikan hasil penelitian bernilai guna positif dan sebisa mungkin menjauhi peluang bernilai negatif.

Paradigma penelitian berfungsi untuk membimbing keseluruhan proses penelitian dan juga akan membantu bagi orang lain untuk dapat memahami cara peneliti melihat dan mendekati penelitian. Dalam penelitian tentang QML untuk memprediksi emisi GRK ada dua paradigma yang dominan, yaitu positivisme logis dan pragmatisme, namun seiring berjalannya waktu dan berkembangnya konteks penelitian, maka paradigma baru dapat muncul sebagai tambahan atau bahkan menggeser paradigma penelitian yang telah ada sebelumnya.

Beberapa strategi perlu diterapkan agar penelitian tentang QML untuk prediksi emisi GRK tidak terjebak dalam pseudosains. Beberapa strategi tersebut di antaranya yaitu memastikan bahwa penelitian seyogianya (a) memiliki ontologi, epistemologi dan aksiologi penelitian yang jelas; (b) didukung bukti ilmiah yang dapat diverifikasi; (c) memenuhi standar ilmiah, menerapkan metodologi ilmiah yang ketat; (d) dapat direplikasi; dan (e) tidak mengajukan klaim yang terlalu fantastis.

Penelitian QML untuk prediksi emisi GRK dapat terpengaruh oleh bias akibat dari proses *data sampling* yang tidak representatif, pemilihan fitur yang tidak tepat, atau kurangnya transparansi, interpretabilitas, dan akuntabilitas algoritma *machine learning*. Penelitian QML untuk prediksi emisi GRK juga memiliki beberapa aspek etis dan moralitas yang perlu dipertimbangkan yaitu keamanan data, keterwakilan populasi secara adil, akuntabilitas algoritma, dampak lingkungan yang perlu dievaluasi, dan keterbukaan ilmiah untuk akses masyarakat. Potensi bias dan aspek etis ini perlu dipahami dan diantisipasi dengan cara mengambil langkah-langkah pencegahan agar hasil penelitian tetap objektif dan adil.

Penelitian QML untuk prediksi emisi GRK juga dinilai terkait dengan aspek ideologi, politik, sosial, budaya, pertahanan dan keamanan negara republik Indonesia. Penelitian ini dinilai berperan dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan nilai-nilai Pancasila, mencerminkan komitmen politik pemerintah terhadap isu lingkungan, dan berpotensi meningkatkan kesadaran masyarakat serta memengaruhi kebijakan pertahanan dan keamanan untuk mengatasi ancaman perubahan iklim. Kolaborasi antara pemerintah, peneliti, dan pemangku kepentingan menjadi kunci dalam memahami dampak dan relevansi penelitian ini dengan aspek-aspek tersebut.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Balai Pembiayaan Pendidikan Tinggi (BPPT) Kemendikbudristek dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas bantuan

Beasiswa Pendidikan Indonesia (BPI) dalam pendidikan doktor di Institut Teknologi Bandung. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Universitas Telkom yang telah memberikan penugasan belajar dan dukungan selama proses penelitian dan publikasi.

6. Daftar Pustaka

- Agassi, J. (2014). Lakatos on the Methodology of Scientific Research Programs. *SpringerBriefs in Philosophy*, 121–127. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06587-8_15.
- Emami Javanmard, M., & Ghaderi, S. F. (2022). A Hybrid Model with Applying Machine Learning Algorithms and Optimization Model to Forecast Greenhouse Gas Emissions with Energy Market Data. *Sustainable Cities and Society*, 82(December 2021), 103886. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103886>.
- Houssein, E. H., Abohashima, Z., Elhoseny, M., & Mohamed, W. M. (2022). Machine learning in the quantum realm: The state-of-the-art, challenges, and future vision. *Expert Systems with Applications*, 194(December 2021), 116512. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116512>.
- Jadhav, A., Rasool, A., & Gyanchandani, M. (2023). Quantum Machine Learning: Scope for real-world problems. *Procedia Computer Science*, 218, 2612–2625. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.235>.
- Khalil, M., McGough, A. S., Pourmirza, Z., Pazhoohesh, M., & Walker, S. (2022). Machine Learning, Deep Learning and Statistical Analysis for forecasting building energy consumption — A systematic review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 115(June), 105287. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105287>.
- Kuhn, T. S. (1962). Introduction to The structure of Scientific Revolution. In *The Structure of Scientific Revolutions* (pp. 1–9).
- Lu, C., Li, S., & Lu, Z. (2022). Building Energy Prediction Using Artificial Neural Networks: A Literature Survey. *Energy and Buildings*, 262, 111718. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111718>.
- Mahayana, D. (2023). *Filsafat Sains: Dari Newton, Einstein, hingga Sains-Data*. ITB Press.
- Sood, S. K., & Pooja. (2023). Quantum Computing Review: A Decade of Research. *IEEE Transactions on Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3284689>
- Valdez, F., & Melin, P. (2023). A Review on Quantum Computing and Deep Learning Algorithms and Their Applications. *Soft Computing*, 27(18), 13217–13236. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07037-4>.
- Wang, P., Hu, J., & Chen, W. (2023). A hybrid Machine Learning Model to Optimize Thermal Comfort and Carbon Emissions of Large-Space Public Buildings. *Journal of Cleaner Production*, 400(March), 136538. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136538>.
- Yulianti, L. P., & Surendro, K. (2022). Implementation of Quantum Annealing: A Systematic Review. *IEEE Access*, 10(June), 73156–73177. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3188117>.
- Zhao, Y., Liu, R., Liu, Z., Liu, L., Wang, J., & Liu, W. (2023). A Review of Macroscopic Carbon Emission Prediction Model Based on Machine Learning. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086876>.