



The Exploring a New Paradigm: Green Economy Transformation in the Era of Quantum Technology and Artificial Intelligence

Rizky Bintang Setiawan*¹

Rizkybintang.2019@student.uny.ac.id

Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Abstract

This research discusses the role of Quantum Technology and Artificial Intelligence (AI) in supporting the concept of a green economy in the era of the Fourth Industrial Revolution. The green economy concept emphasizes economic growth that considers environmental impact and the sustainability of natural resources. However, complex challenges remain in integrating these technologies to achieve these goals. A Systematic Literature Review (SLR) method was used to collect, evaluate, and synthesize relevant studies. The results show that Quantum Technology and AI have significant potential to enhance operational efficiency, optimize resource use, and accelerate innovation across various economic sectors. However, it is essential to consider the balance between efficiency and environmental sustainability, resource conservation, multi-stakeholder partnerships, ethical considerations, and investment in research and development. The findings indicate that the integration of Quantum Technology and AI can support sustainable economic growth, but requires a holistic and responsible approach. Cross-sector collaboration, ethical thinking, and appropriate investment will be key to formulating a sustainable approach to the development and implementation of these technologies in supporting a green economy.

Keywords: Green Economy; Quantum Technology; Artificial Intelligence.

PENDAHULUAN

Setelah terjadi Revolusi Industri, sumber energi tak terbarukan seperti batu bara, gas alam, dan minyak, sangat cepat menjadi pendorong utama bagi perkembangan ekonomi (Onyusheva, 2018). Sehingga membawa konsekuensi serius terhadap lingkungan, terutama di zaman sekarang di mana pertumbuhan ekonomi yang cepat dan pemanfaatan sumber daya alam yang berlebihan mengakibatkan dampak negatif terhadap lingkungan (Mingran et al, 2018). Hal ini meliputi perubahan iklim, hilangnya keanekaragaman hayati yang belum pernah terjadi sebelumnya, dengan lebih dari 6.000 spesies terancam punah akibat eksploitasi berlebihan dan lebih dari 230 juta hektar hutan hilang sejak tahun 2000 (Zeng et al, 2020). Integrasi perlindungan alam ke dalam pengembangan manusia menjadi semakin mendesak di era ini (Scheidel, 2020). Salah satu dilema terbesar yang dihadapi umat manusia adalah bagaimana mencapai pertumbuhan ekonomi tanpa mengorbankan pelestarian lingkungan serta degradasi ekosistem (Kiselitsa et al, 2018; Mohsin et al, 2019). Namun, dalam upaya untuk mencapai kesejahteraan ekonomi, sering kali aspek lingkungan diabaikan atau dikorbankan (Lu et al, 2022).

Dalam beberapa dekade terakhir, upaya untuk menyelamatkan planet kita dari perubahan iklim yang semakin parah dan meredam degradasi lingkungan telah menginspirasi konsep ekonomi hijau (D'amato & Korhonen, 2021). Konsep ini mendorong pertumbuhan ekonomi yang memperhatikan dampak lingkungan dan keberlanjutan sumber daya alam (Lu et al, 2013). Dalam konteks yang lebih dalam, ekonomi hijau berarti sebuah ekonomi yang ramah lingkungan dengan emisi karbon yang rendah, penggunaan sumber daya yang efisien, dan inklusif secara social (Dabyltayeva & Rakhymzhan, 2019). Dalam prakteknya, mencapai keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dan kelestarian lingkungan tetap menjadi tantangan besar (Panayotou, 2016).

Penting untuk memahami bahwa keberlanjutan ekonomi dan lingkungan bukanlah tujuan yang bersifat saling eksklusif, melainkan dua dimensi yang saling berkaitan (Xu & Failer, 2022). Konsep ekonomi hijau telah muncul sebagai upaya untuk mengatasi ketegangan antara pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan lingkungan (Newton, 2011). Dengan mendorong inovasi, efisiensi, dan penerapan teknologi ramah lingkungan, ekonomi hijau bertujuan untuk menciptakan sistem ekonomi yang mempertahankan keberlanjutan lingkungan tanpa mengorbankan pertumbuhan ekonomi (Loiseau et al, 2016)

Namun, transformasi menuju ekonomi hijau tidak lagi cukup dalam menghadapi tantangan kompleks, implementasinya masih dihadapkan pada berbagai hambatan (Barbier, 2011). Keterbatasan teknologi dan sumber daya finansial sering kali menjadi rintangan besar dalam menerapkan model-model ekonomi yang ramah lingkungan (Eaton, 2013). Perkembangan teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan telah memperkenalkan paradigma baru yang memiliki potensi besar untuk mengubah cara kita memandang ekonomi hijau (Riedel et al, 2019). Integrasi teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan dapat memberikan solusi inovatif untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya alam, mengurangi jejak karbon, dan mengatasi masalah lingkungan yang mendesak (Dunjko & Briegef, 2023)

Era teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan menawarkan potensi revolusioner dalam mengatasi konflik ini dengan cara yang inovatif (Baklaga, 2023). Teknologi Quantum menjanjikan komputasi yang jauh lebih efisien dan canggih (Alexeev, 2021). Sementara Kecerdasan Buatan membawa kemampuan analisis data yang mendalam dan pembelajaran mesin yang cerdas. gabungan dari ilmu komputer, logika, biologi, psikologi, filsafat, banyak disiplin lainnya, dan telah mencapai hasil yang luar biasa dalam aplikasi seperti pengenalan suara, pengolahan gambar, pemrosesan bahasa alami, pembuktian teorema otomatis, mengoptimalkan struktur sumber daya manusia dan robot cerdas (Baryannis et al, 2019). Kombinasi dua teknologi ini membuka pintu menuju transformasi ekonomi hijau yang adaptif dan efisien.

Namun, dalam mengintegrasikan teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan dalam konsep ekonomi hijau, sejumlah permasalahan kompleks perlu diatasi (Li et al, 2022). Salah satunya adalah permasalahan keberlanjutan lingkungan (Valeva & Nikolova, 2022). Bagaimana memastikan bahwa penggunaan teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan tidak hanya mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga memperbaiki ekosistem yang telah terdegradasi (Ajagekar & You, 2022). Penyelesaian masalah ini membutuhkan pendekatan holistik yang mengintegrasikan ilmu alam, teknologi, dan kebijakan.

Di satu sisi, teknologi quantum menghadapi tantangan yang serius. Kesulitan dalam menciptakan qubits yang stabil, memahami dan memanipulasi fenomena kuantum yang rumit, serta mengatasi kesalahan kuantum adalah beberapa hambatan utama yang perlu diatasi untuk menggambarkan teknologi quantum sebagai kekuatan transformative dalam ekonomi hijau. Di sisi lain, dalam konteks kecerdasan buatan, permasalahan seperti bias dalam algoritma, kekurangan data berkualitas, dan tantangan etika terkait pengambilan keputusan otomatis merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi kemampuan kecerdasan

buatan dalam memberikan kontribusi optimal terhadap ekonomi hijau.

Selain itu, penting untuk mengidentifikasi bagaimana teknologi quantum dan kecerdasan buatan dapat berkolaborasi untuk menciptakan solusi inovatif dalam mendukung ekonomi hijau. Penggabungan antara kemampuan komputasi quantum untuk menyelesaikan masalah yang kompleks dan kemampuan pembelajaran mesin dalam menganalisis dan memahami pola-pola data memberikan peluang besar untuk memajukan bidang-bidang seperti pengelolaan energi, manufaktur ramah lingkungan, dan pengelolaan sumber daya alam secara efisien.

Peran kolaborasi antara teknologi quantum dan kecerdasan buatan dalam mendukung ekonomi hijau menjadi semakin penting. Penggabungan kekuatan komputasi quantum untuk menyelesaikan masalah kompleks yang terkait dengan energi, material, dan lingkungan, dengan kemampuan kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan proses, menganalisis pola data, dan membuat keputusan cerdas dapat membuka pintu menuju inovasi yang signifikan dalam berbagai sektor.

teknologi quantum dan kecerdasan buatan telah mencapai titik di mana kemungkinan kolaborasi mereka untuk menghadapi tantangan ekonomi hijau perlu dijelajahi secara mendalam. Langkah ini memerlukan pemahaman yang mendalam tentang permasalahan teknis, etika, dan regulasi yang muncul seiring dengan integrasi teknologi ini dalam berbagai aspek kehidupan manusia. Oleh karena itu, perlu kontribusi nyata dalam memahami dan mengatasi hambatan-hambatan tersebut, serta merumuskan rekomendasi kebijakan yang dapat memfasilitasi adopsi teknologi quantum dan kecerdasan buatan dalam mendukung pertumbuhan ekonomi hijau.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji lebih dalam tentang paradigma baru perubahan ekonomi hijau di era teknologi quantum dan kecerdasan buatan. metode systematic literature review (SLR) dilakukan untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian yang relevan, dan menyajikan temuan yang jelas dan sistematis. Systematic Literature Review (SLR) merupakan suatu pendekatan penelitian yang bertujuan untuk mengidentifikasi, menelaah, dan menilai secara menyeluruh semua penelitian yang relevan terkait dengan suatu topik penelitian tertentu. Tujuan utamanya adalah untuk memberikan jawaban yang komprehensif terhadap pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan (Triandini et al., 2019). Menurut Williams et al. (2021), metode ini cocok untuk mengungkapkan focus penelitian di masa yang akan datang. Selain itu, metode ini dapat memberikan keluasan dan kedalaman topik penelitian.

Validitas dan reliabilitas sangat penting untuk memastikan kualitas ilmiah dari penelitian. Untuk memenuhi persyaratan tersebut, penelitian ini menggunakan tiga tahapan yaitu perencanaan review, melakukan review, dan menganalisis hasil review. Tahap pertama mencakup empat langkah yaitu memastikan tujuan penelitian dan merumuskan pertanyaan penelitian. Penelitian ini mengidentifikasi semua kata kunci yang relevan dengan topik penelitian yaitu ekonomi hijau, teknologi quantum, dan kecerdasan buatan. Untuk melakukan pencarian literatur, peneliti menggunakan tiga database berbasis website yaitu WoS (Web of Science), Scopus, dan Google Scholar.

Tahap kedua yaitu mereview dimulai dengan pencarian literatur secara otomatis dan manual tentang judul, abstrak, dan kata kunci. Setelah itu, masing-masing peneliti meneliti semua abstrak untuk memilih dokumen yang terkait langsung dengan penelitian. Langkah ini sangat penting karena hasilnya harus berkaitan dengan topik penelitian. Peneliti juga akan menyimpan artikel yang diragukan untuk ditinjau lebih lanjut. Setelah itu, peneliti melakukan klasifikasi data. Tahap terakhir yaitu menganalisis dan mensintesis informasi atau proses

peninjauan (Castagnoli et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Integrasi Teknologi Quantum Menyelesaikan Masalah Pengelolaan Energi dan Lingkungan

Quantum technology merujuk pada penerapan prinsip-prinsip mekanika kuantum untuk mengembangkan perangkat dan sistem canggih untuk komputasi, sensor, dan komunikasi. Nanotube karbon, yang merupakan objek kuantum satu dimensi, adalah bahan yang menjanjikan untuk perangkat kuantum dengan suhu operasi tinggi karena sifat listrik, optik, dan mekaniknya yang unik. (Baydin et. al, 2022). Integrasi teknologi kuantum membuka peluang baru dalam penyelesaian masalah pengelolaan energi dan lingkungan secara inovatif. Dengan menerapkan prinsip-prinsip mekanika kuantum, teknologi ini memungkinkan pengembangan perangkat yang lebih efisien dan canggih untuk memantau, mengelola, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya energi secara lebih tepat dan efektif. Misalnya, penggunaan nanotube karbon sebagai bahan dalam perangkat kuantum dapat memperluas kemungkinan pembangkitan energi yang ramah lingkungan serta memungkinkan pemantauan lingkungan yang lebih akurat untuk mendukung upaya pelestarian alam. Integrasi teknologi kuantum menjanjikan solusi inovatif dalam mendukung pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan tanpa mengorbankan lingkungan.

Integrasi teknologi kuantum dapat membantu menyelesaikan masalah pengelolaan energi dan lingkungan dalam beberapa cara:

1. **Manajemen Energi yang Efisien:** Komputasi kuantum dapat mengoptimalkan konsumsi energi di berbagai sektor, seperti transportasi, industri, dan pertanian, dengan memberikan simulasi yang lebih akurat dan efisien dari sistem-sistem kompleks. Hal ini dapat menghasilkan penghematan energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Ivanovych et. al, 2021). Integrasi teknologi kuantum dalam pengelolaan energi dan lingkungan menawarkan solusi inovatif untuk tantangan-tantangan kompleks saat ini. Penggunaan komputasi kuantum, optimisasi konsumsi energi di sektor-sektor vital seperti transportasi, industri, dan pertanian dapat dilakukan dengan lebih akurat dan efisien. Simulasi yang dihasilkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang sistem-sistem kompleks, memungkinkan untuk identifikasi pola-pola yang tidak terlihat sebelumnya dan pengambilan keputusan yang lebih tepat. Hasilnya, potensi untuk penghematan energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca menjadi lebih besar, membuka jalan menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.
2. **Integrasi Energi Terbarukan:** Teknologi kuantum dapat meningkatkan integrasi sumber energi terbarukan ke dalam jaringan, menjadikan sistem energi lebih tangguh dan berkelanjutan. Teknologi blockchain, sebagai contoh, dapat digunakan untuk mengelola perdagangan energi berlebih yang dihasilkan di mikro-grid, memastikan keamanan keuangan dan struktural untuk transaksi energi. (Barceló et. al, 2023). Integrasi teknologi kuantum dalam pengelolaan energi dan lingkungan juga memberikan solusi yang signifikan dalam mengintegrasikan sumber energi terbarukan ke dalam grid, meningkatkan ketahanan dan keberlanjutan sistem energi secara keseluruhan. Teknologi blockchain, sebagai contoh, dapat digunakan untuk mengelola perdagangan energi berlebih yang diproduksi dalam mikro-grid, sehingga memastikan keamanan finansial dan struktural untuk transaksi energi. Hal ini tidak hanya mendukung adopsi energi terbarukan secara lebih luas, tetapi juga mendorong perkembangan infrastruktur energi yang lebih ramah lingkungan.
3. **Jaringan Cerdas dan Respons Permintaan:** Komputasi kuantum dapat meningkatkan kinerja jaringan cerdas dan sistem respons permintaan, yang sangat penting untuk

mengelola konsumsi energi dan menjaga stabilitas jaringan. Algoritma canggih dan teknik pembelajaran mesin dapat membantu memprediksi permintaan energi dan mengoptimalkan distribusi energi, mengurangi beban puncak dan meningkatkan manajemen energi secara keseluruhan. (Kumar et. al, 2023). Integrasi teknologi kuantum dalam pengelolaan energi dan lingkungan juga dapat memperbaiki kinerja jaringan pintar dan sistem respons permintaan, yang sangat penting untuk mengelola konsumsi energi dan menjaga stabilitas grid. Algoritma canggih dan teknik pembelajaran mesin dapat membantu memprediksi permintaan energi dan mengoptimalkan distribusi energi, mengurangi beban puncak dan meningkatkan pengelolaan energi secara keseluruhan. Hal ini dapat menyebabkan efisiensi yang lebih besar dalam penggunaan energi dan mengurangi dampak lingkungan dari konsumsi energi yang berlebihan.

4. Penangkapan dan Pemanfaatan Karbon: Komputasi kuantum dapat digunakan untuk mengembangkan teknologi penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon atau carbon capture, utilization, and storage (CCUS) yang lebih efisien, yang penting untuk mengurangi emisi CO₂ dan mitigasi perubahan iklim. Teknik pemodelan dan optimisasi canggih dapat membantu mengoptimalkan kinerja sistem CCUS dan mengurangi biayanya. (Li et. al, 2015). Integrasi teknologi kuantum dalam pengelolaan energi dan lingkungan juga dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi penangkapan karbon, penggunaan, dan penyimpanan (CCUS) yang lebih efisien. Hal ini sangat penting untuk mengurangi emisi CO₂ dan mengatasi perubahan iklim. Teknik pemodelan dan optimisasi canggih dapat membantu meningkatkan kinerja sistem CCUS dan mengurangi biaya operasionalnya. Dengan demikian, teknologi kuantum memiliki potensi untuk menjadi solusi yang efektif dalam mengatasi tantangan lingkungan terkait dengan emisi karbon.
5. Pemantauan dan Manajemen Lingkungan: Sensor kuantum dapat digunakan untuk memantau kondisi lingkungan, seperti kualitas udara dan air, dan membantu dalam pengembangan strategi manajemen lingkungan yang lebih efektif. Kriptografi kuantum juga dapat meningkatkan keamanan data dan privasi dalam sistem pemantauan lingkungan. (Kumar et. al, 2023). Integrasi teknologi kuantum menawarkan solusi inovatif dalam pengelolaan energi dan lingkungan, salah satunya melalui pemantauan dan manajemen lingkungan yang lebih efektif. Penggunaan sensor kuantum membuat kondisi lingkungan seperti kualitas udara dan air dapat dipantau secara lebih akurat. Hal ini memungkinkan pengembangan strategi manajemen lingkungan yang lebih tepat dan efisien. Selain itu, kriptografi kuantum juga dapat diterapkan untuk meningkatkan keamanan data dan privasi dalam sistem pemantauan lingkungan, menjaga integritas informasi yang terkait dengan lingkungan dari ancaman keamanan. Integrasi teknologi kuantum dapat membantu meningkatkan efektivitas dalam pemantauan dan manajemen lingkungan, yang sangat penting untuk keberlanjutan lingkungan.

Dampak Artificial Intelligent terhadap Kemampuan Analisis Data dan Pengambilan Keputusan

Kecerdasan buatan kuantum dapat menjadi pendorong untuk keberlanjutan. Tidak sekadar profitabilitas bisnis dan efisiensi operasional, kecerdasan buatan kuantum memiliki potensi untuk mengatasi beberapa tantangan paling mendesak di dunia. Mulai dari pemodelan pola iklim yang kompleks hingga optimasi jaringan energi terbarukan, kecerdasan buatan kuantum dapat dimanfaatkan sebagai kekuatan untuk kebaikan, sejalan dengan tujuan keberlanjutan global dan berkontribusi pada dunia yang lebih adil (Preskill, 2018).

Kecerdasan buatan kuantum menjanjikan kemampuan analisis data yang jauh lebih canggih dalam menangani tantangan kompleks terkait dengan keberlanjutan. Melalui kemampuan komputasi yang ditingkatkan oleh kuantum, analisis data dapat dilakukan dengan lebih mendalam dan akurat, memungkinkan pemodelan yang lebih presisi terhadap

pola-pola iklim yang kompleks. Selain itu, kecerdasan buatan kuantum juga dapat digunakan untuk mengoptimalkan jaringan energi terbarukan dengan cara yang belum pernah terbayangkan sebelumnya, membantu dalam penentuan strategi yang efisien untuk pemanfaatan sumber daya energi yang ramah lingkungan.

Tidak hanya itu, kecerdasan buatan kuantum juga memiliki potensi untuk mengubah cara pengambilan keputusan di berbagai bidang dengan memanfaatkan data secara lebih efektif. Melalui analisis data yang lebih canggih dan akurat, keputusan yang diambil dapat didasarkan pada informasi yang lebih mendalam dan terperinci. Hal ini membuka peluang untuk mengatasi tantangan keberlanjutan dengan strategi kebijakan yang lebih cerdas dan berkelanjutan. Kecerdasan buatan kuantum tidak hanya menjadi alat untuk meningkatkan efisiensi operasional bisnis, tetapi juga menjadi kekuatan yang dapat mengubah paradigma dalam mencapai tujuan keberlanjutan global secara lebih efektif.

Inovasi kecerdasan buatan kuantum mendapatkan penerimaan yang luas, organisasi dan pemerintah harus berinvestasi dalam membangun kepercayaan pada sistem-sistem ini. Ini termasuk memastikan langkah-langkah keamanan yang kuat, memfasilitasi transparansi dalam algoritma yang ditingkatkan oleh kuantum, dan memprioritaskan pertimbangan etika dalam aplikasi kecerdasan buatan kuantum (Wehner et. al, 2018).

Pengembangan kecerdasan buatan kuantum membawa implikasi yang signifikan terhadap kemampuan analisis data dan pengambilan keputusan. Seiring dengan adopsi yang meluas, organisasi dan pemerintah diharapkan untuk mengalokasikan sumber daya yang memadai untuk membangun kepercayaan pada teknologi ini. Hal ini melibatkan penerapan langkah-langkah keamanan yang kuat guna melindungi data sensitif, memastikan integritas sistem, dan mencegah penyalahgunaan. Selain itu, transparansi dalam pengembangan dan implementasi algoritma kecerdasan buatan kuantum perlu ditingkatkan, sehingga masyarakat dapat memahami dan mempercayai cara kerja teknologi tersebut.

Pentingnya pertimbangan etika juga menjadi sorotan dalam penerapan kecerdasan buatan kuantum. Organisasi dan pemerintah harus memprioritaskan aspek-etika dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini, mengingat potensi dampaknya yang luas terhadap masyarakat dan lingkungan. Upaya memperhatikan nilai-nilai etika, seperti keadilan, privasi, dan keamanan, dapat memastikan bahwa kecerdasan buatan kuantum diimplementasikan dengan cara yang bertanggung jawab dan sesuai dengan norma-norma sosial yang berlaku. Langkah tersebut akan membantu membangun kepercayaan masyarakat dan mendorong penerimaan yang lebih luas terhadap kemajuan teknologi kecerdasan buatan kuantum.

Era kecerdasan buatan kuantum tidak dapat berkembang secara terisolasi. Ini menuntut upaya kolaboratif dari para peneliti, bisnis, pembuat kebijakan, pendidik, dan masyarakat umum. Membentuk konsorsium kuantum multi-pihak, memfasilitasi kemitraan publik-swasta, dan mendorong proyek kuantum sumber terbuka dapat mempercepat dampak positif kecerdasan buatan kuantum, memastikan bahwa manfaatnya merata dan inklusif (Montanaro, 2016).

Era kecerdasan buatan kuantum memerlukan kolaborasi lintas sektor untuk dapat berkembang secara maksimal. Peran para peneliti, pelaku bisnis, pembuat kebijakan, pendidik, dan masyarakat umum sangatlah penting. Pembentukan konsorsium kuantum multi-pihak, berkolaborasi dalam kemitraan publik-swasta, dan mendukung proyek-proyek kuantum sumber terbuka, kita dapat mempercepat adopsi dan dampak positif kecerdasan buatan kuantum. Langkah-langkah ini tidak hanya akan memastikan bahwa manfaatnya merata dan inklusif, tetapi juga membantu mengatasi tantangan yang kompleks yang dihadapi dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini.

Kolaborasi lintas sektor juga memungkinkan adanya pertukaran pengetahuan dan

sumber daya yang lebih luas, mempercepat inovasi, dan memperluas cakupan teknologi kecerdasan buatan kuantum. Melalui keterlibatan berbagai pihak dari masyarakat, termasuk pelaku bisnis, pemerintah, dan akademisi, kita dapat mengidentifikasi kebutuhan nyata, mengembangkan solusi yang lebih holistik, dan mengoptimalkan pemanfaatan teknologi ini untuk kepentingan bersama. Kolaborasi lintas sektor menjadi kunci dalam memastikan bahwa kecerdasan buatan kuantum dapat memberikan dampak yang signifikan dan berkelanjutan bagi masyarakat secara luas.

Merangkul perubahan dan inovasi di era kecerdasan buatan kuantum bukan hanya tentang keahlian teknologi tetapi juga tentang membina ekosistem holistik di mana teknologi dan manusia berpadu. Ini tentang membayangkan masa depan di mana kemampuan yang ditingkatkan oleh kuantum memperbesar potensi manusia, mendorong keberlanjutan, dan mendorong kolaborasi global. Organisasi dan masyarakat yang mendekati era transformatif ini dengan keterbukaan, adaptabilitas, dan semangat kolaborasi akan mendapatkan manfaat yang tidak terukur, membuka masa depan yang adil, berkelanjutan, dan penuh dengan kemungkinan (How and Cheah, 2014).

Mengadaptasi diri dan mengadopsi inovasi di era kecerdasan buatan kuantum tidak hanya melibatkan kemahiran teknologi semata, tetapi juga melibatkan pembangunan ekosistem yang menyeluruh di mana teknologi dan manusia saling melengkapi. Ini melibatkan visi terhadap masa depan di mana kemampuan yang diperkuat oleh teknologi kuantum akan memperluas potensi manusia, mendorong keberlanjutan, dan mempromosikan kolaborasi global. Organisasi dan masyarakat yang memasuki era transformasional ini dengan sikap terbuka, kemampuan beradaptasi, dan semangat untuk berkolaborasi akan merasakan manfaat yang luar biasa, membuka jalan menuju masa depan yang adil, berkelanjutan, dan penuh dengan peluang.

Kolaborasi antara Teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan sebagai Inovasi dalam Pengelolaan Sumber Daya Alam

Menurut Tawfik (2020) Teknologi kuantum dan kecerdasan buatan (AI) memiliki potensi untuk secara signifikan memengaruhi pengelolaan sumber daya alam dengan meningkatkan efisiensi, mengurangi limbah, dan mempromosikan praktik berkelanjutan. Teknologi ini dapat diterapkan dalam berbagai aspek pengelolaan sumber daya alam, termasuk pertanian, produksi energi, dan pelestarian lingkungan.

1. **Pertanian:** AI dan teknologi kuantum dapat digunakan untuk mengoptimalkan hasil panen, mengurangi penggunaan air, dan meningkatkan kesehatan tanah. AI dapat menganalisis data dari citra satelit, pola cuaca, dan komposisi tanah untuk memberikan petani wawasan real-time tentang kesehatan tanaman dan potensi masalah. Komputasi kuantum dapat membantu mengembangkan model prakiraan cuaca yang lebih akurat, memungkinkan petani untuk membuat keputusan yang lebih baik tentang waktu tanam dan panen. Selain itu, AI dapat digunakan untuk mengembangkan teknik pertanian presisi, yang menargetkan area tertentu dari lahan dengan jumlah air, pupuk, dan nutrisi yang tepat, mengurangi limbah dan meningkatkan hasil.
2. **Produksi Energi:** AI dan teknologi kuantum dapat meningkatkan efisiensi produksi dan distribusi energi. AI dapat menganalisis data dari jaringan energi dan pola cuaca untuk memprediksi permintaan energi dan menyesuaikan produksi sesuai kebutuhan, mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi. Komputasi kuantum dapat membantu mengembangkan panel surya dan baterai yang lebih efisien, membuat sumber energi terbarukan lebih layak. Selain itu, AI dapat digunakan untuk mengoptimalkan penggunaan energi di bangunan dan proses industri, mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan.
3. **Konservasi Lingkungan:** AI dan teknologi kuantum dapat membantu memantau dan melestarikan sumber daya alam, seperti hutan, sumber daya air, dan habitat satwa liar. AI

dapat menganalisis citra satelit dan data lainnya untuk mendeteksi perubahan dalam ekosistem, mengidentifikasi area yang berisiko deforestasi atau kehilangan habitat, dan melacak populasi satwa liar. Komputasi kuantum dapat membantu mengembangkan model iklim yang lebih akurat, memungkinkan prediksi perubahan lingkungan yang lebih baik dan pengembangan strategi konservasi yang lebih efektif.

Kolaborasi antara teknologi kuantum dan kecerdasan buatan (AI) menjanjikan inovasi yang signifikan dalam pengelolaan sumber daya alam, terutama dalam sektor pertanian. Melalui penggunaan AI, data dari citra satelit, pola cuaca, dan komposisi tanah dapat dianalisis secara mendalam untuk memberikan petani wawasan real-time tentang kondisi tanaman dan potensi masalah. Pada sisi lain, teknologi kuantum dapat meningkatkan akurasi model prakiraan cuaca, memungkinkan petani untuk membuat keputusan yang lebih tepat dalam pengaturan waktu tanam dan panen. Kolaborasi ini juga memungkinkan pengembangan teknik pertanian presisi yang menargetkan penggunaan air, pupuk, dan nutrisi dengan tepat di area-area tertentu, sehingga mengurangi limbah dan meningkatkan hasil panen secara keseluruhan. Kolaborasi ini menjanjikan solusi inovatif untuk meningkatkan produktivitas pertanian sambil memperhatikan efisiensi penggunaan sumber daya dan kesehatan lingkungan.

Kolaborasi antara teknologi kuantum dan kecerdasan buatan (AI) menawarkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi produksi dan distribusi energi, membawa inovasi yang signifikan dalam pengelolaan sumber daya alam. AI, data dari jaringan energi dan pola cuaca dapat dianalisis untuk memprediksi permintaan energi dan menyesuaikan produksi secara tepat waktu, sehingga mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi keseluruhan. Teknologi kuantum dapat memainkan peran penting dalam mengembangkan panel surya dan baterai yang lebih efisien, memperkuat keberlanjutan sumber energi terbarukan. Penggunaan AI juga dapat dioptimalkan dalam mengelola penggunaan energi di berbagai lingkungan, termasuk bangunan dan proses industri, sehingga berpotensi mengurangi konsumsi energi secara keseluruhan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Kolaborasi ini bukan hanya membawa manfaat dalam efisiensi energi, tetapi juga membuka pintu bagi pengembangan teknologi yang lebih ramah lingkungan. Melalui integrasi teknologi kuantum dan kecerdasan buatan, peluang untuk mengoptimalkan produksi dan penggunaan energi secara lebih cerdas dan efisien semakin meningkat. Hal ini membawa implikasi positif dalam upaya menjaga keseimbangan ekologi dan mengurangi jejak karbon, sejalan dengan upaya global untuk mencapai keberlanjutan lingkungan. Kolaborasi antara teknologi kuantum dan kecerdasan buatan menjanjikan langkah inovatif dalam transformasi energi dan pengelolaan sumber daya alam yang lebih berkelanjutan dan adaptif.

Kolaborasi antara teknologi kuantum dan kecerdasan buatan menjanjikan inovasi yang signifikan dalam pengelolaan sumber daya alam, khususnya dalam upaya konservasi lingkungan. AI, data dari citra satelit dan informasi lainnya dapat dianalisis untuk memantau perubahan dalam ekosistem, mengidentifikasi potensi risiko deforestasi atau kehilangan habitat, dan melacak perubahan populasi satwa liar. Sementara itu, teknologi kuantum dapat memperkuat kontribusinya dengan mengembangkan model iklim yang lebih presisi, yang dapat membantu dalam memprediksi perubahan lingkungan dengan lebih akurat, serta merancang strategi konservasi yang lebih efektif.

Kolaborasi ini bukan hanya memberikan kemampuan untuk memahami dan memantau sumber daya alam dengan lebih baik, tetapi juga membuka peluang untuk pengembangan strategi konservasi yang lebih inovatif. Integrasi teknologi kuantum dan kecerdasan buatan menjadikan pengelolaan dan pelestarian lingkungan menjadi lebih terarah dan efisien, membantu memastikan keberlanjutan ekosistem yang penting bagi kehidupan manusia dan makhluk lainnya. Ini mewakili langkah signifikan dalam upaya global untuk menjaga

keanekaragaman hayati dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, menciptakan landasan untuk masa depan yang lebih berkelanjutan bagi generasi mendatang. Teknologi kuantum dan AI memiliki potensi untuk merevolusi pengelolaan sumber daya alam dengan meningkatkan efisiensi, mengurangi limbah, dan mempromosikan praktik berkelanjutan. Namun, implementasi teknologi ini memerlukan investasi yang signifikan dalam penelitian dan pengembangan, serta perubahan dalam cara kita memikirkan dan mengelola sumber daya alam kita. Kolaborasi antara teknologi kuantum dan kecerdasan buatan menawarkan inovasi yang signifikan dalam pengelolaan sumber daya alam, dengan penerapan yang luas mulai dari sektor pertanian hingga konservasi lingkungan. Pada sektor pertanian, integrasi AI dan teknologi kuantum memungkinkan optimasi hasil panen, pengurangan penggunaan air, dan pengembangan teknik pertanian presisi untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi limbah. Sementara itu, dalam konservasi lingkungan, kombinasi kedua teknologi ini memungkinkan pemantauan ekosistem yang lebih akurat dan prediksi perubahan lingkungan yang lebih tepat, mendukung strategi konservasi yang lebih efektif dan berkelanjutan. Kolaborasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan sumber daya alam, tetapi juga mempromosikan upaya pelestarian lingkungan yang lebih efektif dan adaptif, menciptakan landasan yang lebih kokoh untuk keberlanjutan lingkungan di masa depan.

Penerapan Teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan Mendukung Pertumbuhan Ekonomi yang Berkelanjutan

Munculnya revolusi Industri 4.0 berpengaruh kecerdasan buatan (AI), sebagai teknologi yang sedang berkembang, terhadap ekonomi dan masyarakat telah memicu debat yang luas (Goralski dan Tan, 2022). Berfungsi sebagai teknologi yang luas, banyak sarjana telah menyelidiki dampak AI terhadap kemajuan teknologi dan produktivitas (Haefner et. al, 2021). Terdapat satu pandangan menyatakan bahwa AI memiliki potensi untuk merangsang inovasi teknologi dan meningkatkan produktivitas. (Rammer et. al, 2022). Sudut pandang alternatif menyarankan bahwa AI mungkin akan menimbulkan paradoks produktivitas, dengan dampak negatif pada pertumbuhan produktivitas. Terlihat bahwa pembahasan mengenai pengaruh AI terhadap inovasi teknologi dan produktivitas sangat luas, namun kesimpulan yang konsisten tetap sulit ditemukan. Meskipun terus berkembangnya teknologi baru seperti AI, prevalensi global masalah lingkungan yang parah merupakan tantangan signifikan bagi keberlanjutan global. Paradoks yang jelas ini menyoroti perlunya perspektif yang seimbang. Penyelidikan tentang AI dan pembangunan berkelanjutan, terutama mengenai kapasitasnya untuk memfasilitasi pengembangan hijau dan variasi spasialnya, masih banyak belum terjawab. (Brynjolfsson et. al, 2019).

Teknologi Quantum dan Kecerdasan Buatan (AI) memiliki potensi besar untuk mendukung pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan di era revolusi Industri 4.0. Sebagai teknologi yang sedang berkembang, AI telah menjadi pusat perdebatan luas terkait dampaknya terhadap kemajuan ekonomi dan produktivitas. Beberapa pandangan menekankan potensi AI dalam merangsang inovasi teknologi dan meningkatkan produktivitas, sementara pandangan lain mengkhawatirkan kemungkinan terjadinya paradoks produktivitas yang dapat menghambat pertumbuhan ekonomi. Meskipun masih terdapat perdebatan mengenai hal ini, kenyataannya, implementasi AI dan teknologi Quantum dalam berbagai sektor ekonomi memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan mempercepat inovasi, yang pada gilirannya dapat mendukung pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.

Selain itu, aplikasi AI dan teknologi Quantum juga dapat berperan dalam mengatasi tantangan lingkungan yang dihadapi oleh dunia saat ini. Seiring dengan adopsi teknologi baru seperti AI, tantangan lingkungan yang parah, seperti perubahan iklim dan degradasi

lingkungan, semakin menjadi perhatian utama dalam upaya mencapai keberlanjutan global. Penggunaan AI dan teknologi Quantum dalam mendukung pengembangan hijau dan perlindungan lingkungan dapat menjadi solusi yang signifikan. Melalui analisis data yang mendalam, AI dapat membantu dalam mengidentifikasi pola-pola perilaku lingkungan dan memprediksi dampak dari kebijakan dan tindakan manusia terhadap lingkungan. Sementara itu, teknologi Quantum dapat memberikan kontribusi dalam mengoptimalkan sistem energi dan infrastruktur, serta mempercepat penemuan dan pengembangan solusi-solusi inovatif untuk tantangan lingkungan. Kolaborasi antara AI dan teknologi Quantum dapat menjadi kunci dalam membangun ekonomi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk masa depan.

Menurut penelitian Chen et. al, (2024) hubungan berbentuk U terbalik antara kecerdasan buatan dan pengembangan hijau menyiratkan bahwa ketergantungan berlebihan pada kecerdasan buatan tidak membawa manfaat yang berkelanjutan bagi pengembangan hijau dan bahwa pemerintah perlu mempertimbangkan dengan cermat kecocokan dan efisiensi masukan kecerdasan buatan dalam merancang kebijakan yang relevan, fokus pada hubungan antara inovasi teknologi dan pembangunan berkelanjutan, dan memperkuat pengembangan kecerdasan buatan pada tahap awal, sambil menghindari konsumsi sumber daya berlebihan dan beban lingkungan yang mungkin ditimbulkan oleh investasi berlebihan dalam kecerdasan buatan pada tahap berikutnya. Pada tahap berikutnya, konsumsi sumber daya berlebihan dan beban lingkungan yang disebabkan oleh investasi berlebihan dapat dihindari. Kedua, mengingat bahwa kecerdasan buatan memiliki dampak yang lebih signifikan pada pengembangan hijau di zona-zona intensif modal dan teknologi dan dampak yang relatif lebih kecil di zona-zona intensif tenaga kerja dan non-teknologi, pemerintah harus merumuskan strategi yang berbeda untuk karakteristik dan kebutuhan berbagai wilayah saat merumuskan kebijakan yang relevan.

Terdapat hubungan antara kecerdasan buatan dan pengembangan hijau, yang menandakan bahwa ketergantungan berlebihan pada kecerdasan buatan tidak membawa manfaat yang berkelanjutan bagi pengembangan hijau. Hal ini mengindikasikan bahwa pemerintah perlu mempertimbangkan secara cermat kecocokan dan efisiensi penggunaan kecerdasan buatan dalam merancang kebijakan yang relevan, dengan memfokuskan perhatian pada hubungan antara inovasi teknologi dan pembangunan berkelanjutan. Selain itu, pemerintah harus memperkuat pengembangan kecerdasan buatan pada tahap awal, sambil menghindari risiko konsumsi sumber daya yang berlebihan dan beban lingkungan yang mungkin timbul dari investasi berlebihan pada kecerdasan buatan di tahap berikutnya.

Kecerdasan buatan memiliki dampak yang lebih besar pada pengembangan hijau di zona-zona intensif modal dan teknologi, namun dampaknya relatif lebih kecil di zona-zona intensif tenaga kerja dan non-teknologi. Oleh karena itu, pemerintah perlu merumuskan strategi yang berbeda sesuai dengan karakteristik dan kebutuhan masing-masing wilayah saat merancang kebijakan yang relevan. Untuk zona-zona intensif modal dan teknologi, pemerintah harus terus mendorong dan mendukung penelitian dan pengembangan kecerdasan buatan serta teknologi hijau lainnya untuk mempercepat pembaharuan struktur industri dan memastikan kecerdasan buatan berperan secara efektif dalam mendorong pengembangan hijau. Sementara itu, untuk wilayah-wilayah intensif tenaga kerja dan non-teknologi, penguatan infrastruktur perlu dilakukan untuk mempromosikan aplikasi kecerdasan buatan yang sesuai dengan industri lokal, sambil merumuskan langkah-langkah adaptasi yang diperlukan untuk memastikan transformasi teknologi tidak menyebabkan pengangguran massal. Ini menyoroti pentingnya pendekatan yang beragam dalam merancang kebijakan yang mendukung pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.

Pada zona-zona intensif modal dan teknologi, pemerintah harus terus mendorong dan

mendukung riset dan pengembangan kecerdasan buatan dan teknologi terkait hijau lainnya untuk lebih mempromosikan peningkatan struktur industri dan memastikan bahwa kecerdasan buatan berperan lebih efektif dalam mempromosikan pengembangan hijau. Pada area-area intensif tenaga kerja dan non-teknologi, infrastruktur harus diperkuat untuk mempromosikan aplikasi kecerdasan buatan yang sesuai untuk industri lokal, dan langkah-langkah adaptasi yang sesuai juga harus dirumuskan untuk memastikan bahwa transformasi teknologi tidak menyebabkan pengangguran massal di area-area intensif tenaga kerja. Kecerdasan buatan memiliki dampak tidak langsung pada pengembangan hijau dengan memengaruhi inovasi teknologi hijau dan optimasi struktur industri, menyiratkan bahwa pemerintah harus mempercepat promosi peningkatan industri ramah lingkungan dan inovasi teknologi melalui dukungan keuangan, insentif pajak, dan pembentukan platform kerjasama, serta mendukung transfer dan berbagi teknologi hijau secara global. Terakhir, efek tumpahan spasial yang ditemukan dalam studi ini menekankan pentingnya kerjasama antarwilayah, yang dapat mempromosikan berbagi teknologi baru melalui kecerdasan buatan, mempromosikan koordinasi kebijakan lingkungan antarwilayah, dan secara bersama-sama mempromosikan pengembangan hijau antar wilayah (Chen et. al, 2024).

Upaya pemerintah dalam mendorong dan mendukung penelitian serta pengembangan kecerdasan buatan dan teknologi hijau dalam zona-zona intensif modal dan teknologi, diharapkan dapat mempercepat perubahan struktur industri. Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa kecerdasan buatan dapat berperan secara lebih efektif dalam mempromosikan pengembangan hijau. Pada sisi lain, untuk area-area intensif tenaga kerja dan non-teknologi, penguatan infrastruktur menjadi krusial dalam memfasilitasi adopsi kecerdasan buatan yang sesuai dengan kebutuhan industri lokal. Selain itu, langkah-langkah adaptasi juga harus diterapkan untuk mencegah terjadinya pengangguran massal sebagai dampak dari transformasi teknologi di wilayah-wilayah tersebut.

Pentingnya kecerdasan buatan dalam mendukung pengembangan hijau juga terlihat dari dampak tidak langsungnya terhadap inovasi teknologi hijau dan optimalisasi struktur industri. Pemerintah diharapkan dapat mempercepat promosi pembaharuan industri yang ramah lingkungan serta inovasi teknologi melalui berbagai insentif, seperti dukungan keuangan dan insentif pajak. Selain itu, pendirian platform kerjasama dan dukungan terhadap transfer serta berbagi teknologi hijau secara global juga menjadi langkah yang perlu dilakukan. Terdapat efek tumpahan spasial yang ditemukan dalam studi ini menyoroti pentingnya kerjasama antarwilayah dalam mempromosikan pengembangan hijau secara holistik. Melalui kerjasama ini, berbagi teknologi baru melalui kecerdasan buatan dapat digalakkan, koordinasi kebijakan lingkungan antarwilayah dapat ditingkatkan, dan pengembangan hijau secara menyeluruh antarwilayah dapat diwujudkan.

KESIMPULAN

Teknologi kuantum dan kecerdasan buatan (AI) memiliki potensi besar untuk mendukung pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan di era revolusi Industri 4.0, dengan meningkatkan efisiensi operasional, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan mempercepat inovasi di berbagai sektor ekonomi. Namun, penerapan teknologi ini harus mempertimbangkan beberapa faktor penting untuk memastikan dampak positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan ekonomi, seperti keseimbangan antara efisiensi dan keberlanjutan, konservasi sumber daya, kemitraan multi-pihak, pertimbangan etika, dan investasi dalam penelitian serta pengembangan. Kolaborasi lintas sektor dan pendekatan yang etis sangat penting untuk memastikan bahwa teknologi ini digunakan untuk kebaikan bersama, sementara investasi berkelanjutan diperlukan untuk mendukung inovasi yang memperhatikan dampak lingkungan. Dengan pengelolaan yang bijaksana, teknologi kuantum

dan AI dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan tanpa mengorbankan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajagekar, A., & You, F. (2022). Quantum computing and quantum artificial intelligence for renewable and sustainable energy: A emerging prospect towards climate neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112493.
- Alexeev, Y., Bacon, D., Brown, K. R., Calderbank, R., Carr, L. D., Chong, F. T., & Thompson, J. (2021). Quantum computer systems for scientific discovery. *PRX Quantum*, 2(1), 017001.
- Baklaga, L. (2023). Revolutionizing Sustainable Energy Production with Quantum Artificial Intelligence: Applications in Autonomous Robotics and Data Management. Green and Low-Carbon Economy. <https://doi.org/10.47852/bonviewGLCE3202683>.
- Barbier, E. (2011, August). The policy challenges for green economy and sustainable economic development. In *Natural resources forum* (Vol. 35, No. 3, pp. 233-245). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Barceló, E., Dimić-Mišić, K., Imani, M., Spasojevic Brkic, V.K., Hummel, M., & Gane, P. (2023). Regulatory Paradigm and Challenge for Blockchain Integration of Decentralized Systems: Example—Renewable Energy Grids. Sustainability. DOI:10.3390/su15032571.
- Baryannis, G., Validi, S., Dani, S., & Antoniou, G. (2019). Supply chain risk management and artificial intelligence: state of the art and future research directions. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2179-2202.
- Baskar, Prabu. Alex Khang, Shalini Annadurai, S. S. Amritha, Pavithra Annadurai. (2024). Quantum Computing Smart City: Fostering Sustainability and Green Infrastructure with Smart City. Applications and Principles of Quantum Computing. IGI Global. DOI: 10.4018/979-8-3693-1168-4.ch010.
- Baydin, A., Tay, F., Fan, J., Manjappa, M., Gao, W., & Kono, J. (2022). Carbon Nanotube Devices for Quantum Technology. *Materials* (Basel, Switzerland), 15(4), 1535. <https://doi.org/10.3390/ma15041535>.
- Castagnoli, R., Büchi, G., Coeurderoy, R., Cugno, M., (2021). Evolution of industry 4.0 and international business: a systematic literature review and a research agenda. *Eur. Manag. J.* <https://doi.org/10.1016/j.emj.2021.09.002> (in press).
- Chen, Mingyue, Shuting Wang, and Xiaowen Wang. (2024). "How Does Artificial Intelligence Impact Green Development? Evidence from China" Sustainability 16, no. 3: 1260. <https://doi.org/10.3390/su16031260>.
- D'amato, D., & Korhonen, J. (2021). Integrating the green economy, circular economy and bioeconomy in a strategic sustainability framework. *Ecological Economics*, 188, 107143.

- Dunjko, V., & Briegel, H. J. (2018). Machine learning & artificial intelligence in the quantum domain: a review of recent progress. *Reports on Progress in Physics*, 81(7), 074001.
- Eaton, D. (2013). Technology and innovation for a green economy. *Review of European, Comparative & International Environmental Law*, 22(1), 62-67.
- Goralski, M. A., & Tan, T. K. (2022). Artificial intelligence and poverty alleviation: Emerging innovations and their implications for management education and sustainable development. *The International Journal of Management Education*, 20(3), 100662.
- Haefner, N., Wincent, J., Parida, V., & Gassmann, O. (2021). Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda ☆. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120392.
- How, M.-L.; Cheah, S.-M. 2024. Forging the Future: Strategic Approaches to Quantum AI Integration for Industry Transformation. *AI*, 5, 290–323. <https://doi.org/10.3390/ai5010015>.
- Ivanovych, K.V., Targonya Vasyliy Serhiyovych, Ludmil Mihaylov and Gaidai Tatiana Viktorivna (2021). Agro-engineering: ways to solve environmental and energy problems in agriculture. *Proceedings of University of Ruse - 2020*, volume 59, book 1.1. FRI-ONLINE-1-AMT&ASVM-02.
- Kiselitsa, E. P., Shilova, N. N., Liman, I. A., & Naumenko, E. E. (2018). Impact of spatial development on sustainable entrepreneurship. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 6(2), 890.
- Kumar, M.V., Nuvvula, R.S., Kumar, P.P., Haroon, N.H., Suryasa, I.W., & Priya, U. (2023). A Review on Demand Side Management System and Its Computer Control Methods. 2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 480-486. DOI:10.1109/ICRERA59003.2023.10269347.
- Li, J., Chen, L., Chen, Y., & He, J. (2022). Digital economy, technological innovation, and green economic efficiency—Empirical evidence from 277 cities in China. *Managerial and Decision Economics*, 43(3), 616-629.
- Li, W., Liu, S.X., Fu, Z., Shi, H., & Xie, Y.L. (2015). A Novel Inexact Two-Stage Stochastic Robust-Compensation Model for Electric Supply Environmental Management Under Uncertainty. *Journal of Energy Resources Technology-transactions of The Asme*, 137, 062001. DOI:10.1115/1.4030844.
- Loiseau, E., Saikku, L., Antikainen, R., Droste, N., Hansjürgens, B., Pitkänen, K., ... & Thomsen, M. (2016). Green economy and related concepts: An overview. *Journal of cleaner production*, 139, 361-371.
- Lu, C.Y.; Zhang, L.; Xue, B.; Yu, X.M.; Zhang, L.M.; Geng, Y. A Measurable and Compare Study on Sustainable Development of the Northeast China. *J. Liaoning Univ. Nat. Sci. Edit.* 2013, 40, 86–91. (In Chinese)
- Lu, C., Liu, X., Zhang, T., Huang, P., Tang, X., & Wang, Y. (2022). Comprehensive Measurement of the Coordinated Development of China's Economic Growth, Energy

- Consumption, and Environmental Conservation. *Energies*, 15(17), 6149.
- Luo, J., Zhuo, W., Liu, S., & Xu, B. (2024). The optimization of carbon emission prediction in low carbon energy economy under big data. *IEEE Access*. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3351468.
- Mingran, W., Min, Z., & Zhaodan, W. (2018). The Coordination and Dynamic Relationship of the Industrial Energy Consumption, Economic Growth and SO₂ Emission—Analysis of Time Series Data of China from 1990 to 2016. *Environmental Processes*, 5, 789-806.
- Mohsin, M., Abbas, Q., Zhang, J., Ikram, M., & Iqbal, N. (2019). Integrated effect of energy consumption, economic development, and population growth on CO₂ based environmental degradation: a case of transport sector. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 32824-32835.
- Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Information*, 2(1), 1-8.
- Newton, A. C. (2011). The green economy and the knowledge economy: Exploring the interface. *International Journal of Green Economics*, 5(3), 231-247.
- Olatunji, O. O., Adedeji, P. A., & Madushele, N. (2021). Quantum computing in renewable energy exploration: status, opportunities, and challenges. *Design, Analysis, and Applications of Renewable Energy Systems*, 549-572. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824555-2.00019-8>.
- Onyusheva, I. (2018). The eco-problems and green economy development in Kazakhstan. In *The eco-problems and green economy development in Kazakhstan: Irina Onyusheva*.
- Panayotou, T. (2016). Economic growth and the environment. *The environment in anthropology*, 24, 140-148.
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79.
- Rammer, C., Fernández, G. P., & Czarnitzki, D. (2022). Artificial intelligence and industrial innovation: Evidence from German firm-level data. *Research Policy*, 51(7), 104555.
- Riedel, M., Kovacs, M., Zoller, P., Mlynek, J., & Calarco, T. (2019). Europe's quantum flagship initiative. *Quantum Science and Technology*, 4(2), 020501.
- Scheidel, A., Del Bene, D., Liu, J., Navas, G., Mingorría, S., Demaria, F., ... & Martínez-Alier, J. (2020). Environmental conflicts and defenders: A global overview. *Global Environmental Change*, 63, 102104.
- Triandini E, Jayanatha S, Indrawan A, Werla Putra G, Iswara B. (2019). Metode Systematic Literature Review untuk Identifikasi Platform dan Metode Pengembangan Sistem Informasi di Indonesia. *Indones J Inf Syst*. 2019;1(2).
- Tawfik, A. (2020). Pollution Control 2019: Environmental Future and Fourth Industrial

Revolution- Ahmed T Tawfik- Scientific Management for Consultancy and Research, Egypt. *Journal of Coastal Zone Management*, 23, 1-2 .5th International Conference on Pollution Control & Sustainable Environment March 14-16, 2019 at LONDON, UK.

Valeva, K., & Nikolova-Alexieva, V. (2022). Impact of Digital Technologies on Green Economic Growth. *International Journal of Renewable Energy Sources*, 7.

Wehner, S., Elkouss, D., & Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412).

Williams, R.I., Clark, L.A., Clark, W.R., Raffo, D.M., 2021. Re-examining systematic literature review in management research: additional benefits and execution protocols. *Eur. Manag. J.* 39 (4), 521–533. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2020.09.007>.

Xu, S., Yang, C., Huang, Z., & Failler, P. (2022). Interaction between digital economy and environmental pollution: New evidence from a spatial perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5074.

Zeng, Y., Maxwell, S., Runting, R. K., Venter, O., Watson, J. E., & Carrasco, L. R. (2020). Environmental destruction not avoided with the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, 3(10), 795-798.