

**TEKNOLOGI ALAM SEKITAR DAN TENAGA BERTERASKAN
NILAI: SATU NARATIF DARI DIMENSI SAINTIFIK, PENDIDIKAN
DAN ETIKA ISLAM**

**VALUE-BASED ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY AND ENERGY: A
NARRATIVE FROM SCIENTIFIC, EDUCATIONAL, AND ISLAMIC
ETHICAL PERSPECTIVES**

Mardiana Idayu Ahmad*

Pusat Pengajian Teknologi Industri, Universiti Sains Malaysia,
11800 Pulau Pinang, Malaysia

Nor Wardah Mohamad Senusi

Pusat Pengajian Teknologi Industri, Universiti Sains Malaysia,
11800 Pulau Pinang, Malaysia

Mohammad Aliff Shakir

Pusat Pengajian Teknologi Industri, Universiti Sains Malaysia,
11800 Pulau Pinang, Malaysia

Abdul Khalil H.P.S.

Fakulti Perniagaan, Hospitaliti dan Teknologi, Universiti Islam Melaka,
Kuala Sungai Baru, 78200 Melaka, Malaysia

Mohd Shukri Hanapi

Pusat Kajian Pengurusan Pembangunan Islam, Universiti Sains Malaysia,
11800 Pulau Pinang, Malaysia

**Corresponding Author's Email: mardianaidayu@usm.my*

Article History:

Received : 26 August 2025

Accepted : 14 November 2025

Published : 24 December 2025

© Penerbit Universiti Islam Melaka

To cite this article:

Ahmad, M. I., Mohamad Senusi, N. W., Shakir, M. A., Abdul Khalil H. P. S. & Hanapi, M. S. (2025). Teknologi Alam Sekitar Dan Tenaga Berteraskan Nilai: Satu Naratif Dari Dimensi Saintifik, Pendidikan Dan Etika Islam. *Jurnal 'Ulwan*, 10(2), 251-276.

ABSTRAK

Teknologi alam sekitar dan tenaga memainkan peranan penting dalam menangani cabaran kelestarian semasa, khususnya yang berkaitan dengan perubahan iklim, penyusutan sumber dan degradasi alam sekitar. Makalah ini membentangkan satu tinjauan integratif yang menghuraikan teknologi tersebut dari tiga dimensi utama: saintifik, pendidikan dan etika Islam. Dari dimensi saintifik, makalah ini menyoroti kemajuan dalam sistem tenaga boleh diperbaharui, bahan lestari, teknologi pintar dan inovasi perlindungan alam sekitar yang menyokong peralihan global ke arah pembangunan rendah karbon. Dimensi pendidikan pula menekankan kepentingan literasi kelestarian, integrasi STEM dan pembelajaran berasaskan pengalaman dalam memperkasa pelajar memahami implikasi teknologi serta mengamalkan tindakan yang bertanggungjawab terhadap alam sekitar. Sementara itu, dimensi etika Islam menyediakan kerangka nilai berasaskan prinsip *al-khalifah* (tanggungjawab penjagaan bumi), *al-mizan* (keseimbangan), *al-wasatiyyah* (kesederhanaan) dan larangan *al-israf* (pembaziran), yang membimbing penggunaan teknologi secara beradab, adil dan lestari. Secara keseluruhannya, tinjauan ini menunjukkan bahawa penyelesaian terhadap isu alam sekitar dan tenaga tidak dapat bergantung kepada kemajuan saintifik semata-mata. Keberkesanannya memerlukan sokongan pendidikan yang membentuk kesedaran serta kompetensi pengguna, di samping prinsip etika Islam yang memastikan teknologi dimanfaatkan dengan penuh tanggungjawab dan berorientasikan kemaslahatan. Integrasi ketiga-tiga dimensi ini menyediakan asas holistik untuk membangunkan amalan teknologi yang mapan serta membina komuniti yang mampu memelihara bumi demi generasi akan datang.

Kata kunci: teknologi alam sekitar, tenaga lestari, pendidikan, etika Islam

ABSTRACT

*Environmental and energy technologies play a critical role in addressing contemporary sustainability challenges, particularly those arising from climate change, resource depletion, and environmental degradation. This article presents an integrative review that examines these technologies through scientific, educational, and Islamic ethical perspectives. From the scientific dimension, the paper highlights advancements in renewable energy systems, sustainable materials, smart technologies, and environmental protection innovations that support the global transition toward low-carbon development. The educational dimension emphasises the importance of sustainability literacy, STEM integration, and experiential learning in empowering learners to understand technological impacts and adopt responsible environmental practices. Meanwhile, the Islamic ethical dimension provides a value-based framework grounded in the principles of *al-khalifah* (stewardship), *al-mizan* (balance), *al-wasatiyyah* (moderation), and the prohibition of *al-israf* (wastefulness), guiding the ethical use of technology to preserve ecological balance and promote societal well-being. Overall, this review demonstrates that effective environmental and energy solutions require more than scientific advancement alone; they must be supported by education that cultivates awareness and competencies, as well as ethical principles that ensure technology is*

applied responsibly and equitably. The article argues that integrating science, education, and Islamic ethics provides a holistic foundation for shaping sustainable technological practices and nurturing communities capable of safeguarding the Earth for future generations.

Keywords: *Environmental technology, sustainable energy, education, Islamic ethics*

1.0 PENGENALAN

Landskap alam sekitar dan tenaga global kini semakin mencabar. Peningkatan suhu global, kejadian cuaca ekstrem, pencairan ais kutub serta kemerosotan kualiti udara dan air mencerminkan tekanan serius terhadap sistem ekologi dunia. Laporan Panel Antara Kerajaan mengenai Perubahan Iklim (IPCC) menegaskan bahawa aktiviti manusia, khususnya pembakaran bahan api fosil, penebangan hutan dan urbanisasi, merupakan pamacu utama perubahan iklim global (Daioglou et al., 2020). Kebergantungan berterusan sektor tenaga terhadap bahan api fosil terus memburukkan keadaan ini. Laporan World Energy Outlook menunjukkan bahawa lebih 80% tenaga dunia masih dijana daripada sumber fosil, sekali gus menyumbang secara signifikan kepada pelepasan gas rumah kaca (Dechamps, 2023). Kesan berantai daripada kebergantungan ini dapat dilihat melalui peningkatan degradasi tanah, kehilangan biodiversiti dan kekurangan air tawar yang menjejaskan daya tampung ekosistem bumi (Al Khaffaf et al., 2024).

Seiring dengan cabaran ini, penyelidikan global semakin menekankan pembangunan teknologi alam sekitar dan tenaga bersih. Inovasi seperti tenaga solar, angin, hidro dan hidrogen hijau, sistem kecekapan tenaga, bahan rendah karbon serta teknologi rawatan air dan pengurusan sisa maju telah menunjukkan potensi besar dalam mengurangkan impak antropogenik (Shangguan et al., 2024, Abdelghany et al., 2026). Kajian mengenai bahan lestari pula menekankan penggunaan polimer biodegradasi, komposit kitar semula dan bahan berasaskan bio bagi menyokong ekonomi kitaran (Shakir et al., 2024d). Dalam domain pendidikan, UNESCO dan sarjana pendidikan kelestarian menegaskan kepentingan Pendidikan untuk Pembangunan Lestari (ESD), yang membangunkan literasi ekologi, pemikiran sistem, kemahiran saintifik serta keupayaan membuat keputusan beretika (Ji et al., 2024). Pendekatan pedagogi seperti pembelajaran berasaskan projek, simulasi tenaga, penggunaan sensor IoT, dan integrasi Sains, Teknologi, Kejuruteraan dan Matematik (STEM) terbukti meningkatkan pemahaman pelajar tentang hubungan antara teknologi, masyarakat dan alam sekitar (Shakir et al., 2025c).

Dari perspektif Islam, isu alam sekitar ini termasuk dalam kategori *habl min al-'alam* (hubungan manusia dengan seluruh alam). Ia berkait rapat dengan konsep manusia sebagai khalifah di bumi, iaitu manusia diberi tanggungjawab untuk menjaga dan memakmurkan alam sekitar. Dalam melaksanakan tugas sebagai khalifah ini, banyak ajaran Islam yang boleh diterapkan, antaranya prinsip *al-mīzān* (keseimbangan), amanah (tanggungjawab), *al-'adl* (keadilan), *al-wasatiyyah* (kesederhanaan) dan larangan melakukan *al-fasād* (kerosakan) menjadi asas moral dalam pengurusan sumber secara berhemah ('Izz al-Dīn, 2000, Kubro et al., 2021). Kajian kontemporari turut menunjukkan bahawa nilai Islam semakin relevan dalam

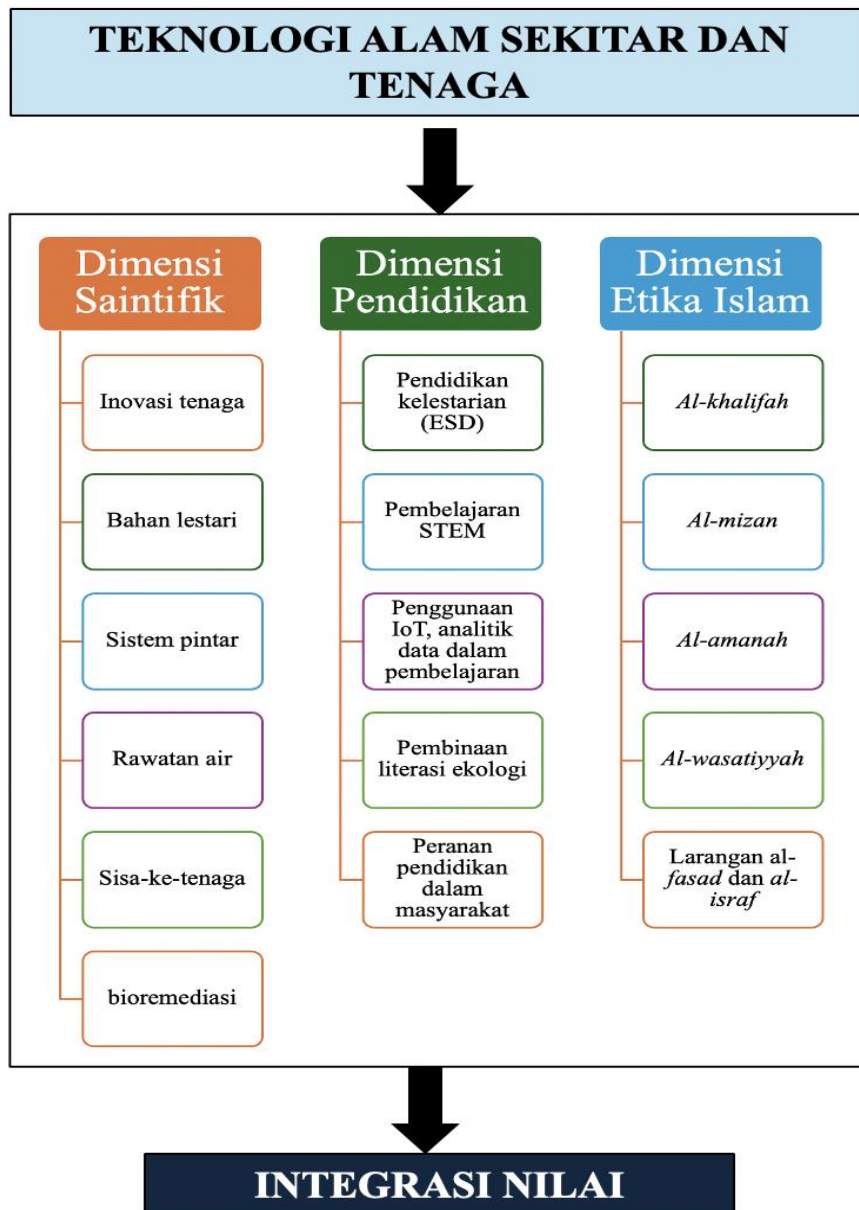
perbincangan mengenai keadilan iklim dan teknologi hijau (Mostfa, 2024, Sobirin et al., 2023). Para sarjana menegaskan bahawa krisis ekologi moden bukan sahaja bersifat saintifik, tetapi juga berpunca daripada krisis moral dan spiritual yang memerlukan pemulihan hubungan manusia–alam melalui etika lestari berteraskan agama.

Walaupun literatur terdahulu menunjukkan perkembangan pesat dalam ketiga-tiga dimensi ini, terdapat beberapa jurang yang ketara. Pertama, wacana teknologi alam sekitar dan tenaga masih banyak tertumpu kepada inovasi saintifik tanpa integrasi bersama pendidikan dan etika Islam secara holistic (Apriani et al., 2021). Kedua, kajian pendidikan kelestarian sering menekankan pedagogi dan tingkah laku, tetapi kurang mengaitkannya dengan panduan etika berasaskan agama. Ketiga, sorotan literatur Islam mengenai alam sekitar masih berpecah antara teologi, *fiqh* dan moral, tanpa pengaplikasian yang jelas kepada teknologi moden dan isu tenaga. Keempat, tiada kerangka konseptual yang menggabungkan ketiga-tiga dimensi saintifik, pendidikan dan etika Islam sebagai asas memahami kelestarian secara menyeluruh.

Berdasarkan jurang ini, keaslian kajian terletak pada usaha mensintesis teknologi alam sekitar dan tenaga melalui tiga lensa utama, iaitu dimensi saintifik, pendidikan dan etika Islam. Pendekatan integratif ini masih kurang diberi penekanan dalam literatur, meskipun ketiga-tiganya saling melengkapi dalam membentuk pemahaman kelestarian yang menyeluruh. Sehubungan itu, tujuan utama penulisan ini adalah untuk membangunkan satu kerangka konseptual holistik yang mengintegrasikan ketiga-tiga dimensi tersebut dalam memahami peranan teknologi alam sekitar dan tenaga sebagai asas kelestarian global masa kini dan masa depan. Rajah 1 menggambarkan struktur hubungan antara dimensi saintifik, pendidikan dan etika Islam serta bagaimana integrasi nilai menjadi asas kepada pembangunan teknologi yang lestari dan beretika.

2.0 KONSEP DAN DEFINISI

Teknologi alam sekitar dan tenaga merujuk kepada rangkaian inovasi, sistem dan pendekatan saintifik yang direka bentuk untuk melindungi alam sekitar, meningkatkan kecekapan penggunaan sumber, dan menyokong peralihan kepada pembangunan rendah karbon (Kabeyi et al., 2022). Dalam konteks global, teknologi alam sekitar meliputi sistem rawatan air, teknologi kawalan pencemaran, pengurusan sisa bersepadu, bahan lestari serta penyelesaian berasaskan bio yang mengurangkan beban ekologi (Zaman et al., 2022, Shakir et al., 2024a). Sementara itu, teknologi tenaga merangkumi tenaga boleh diperbaharui seperti solar, angin, hidro dan tenaga bio yang terbukti berupaya mengurangkan pergantungan kepada bahan api fosil dan menurunkan pelepasan gas rumah kaca (Lee et al., 2024, Senusi et al., 2024). Kedua-dua bidang ini kini menjadi tunjang penting dalam usaha menangani perubahan iklim, pencemaran, kehilangan biodiversiti dan penyusutan sumber bumi.



Rajah 1: Kerangka konseptual teknologi alam sekitar dan tenaga berteraskan dimensi saintifik, pendidikan dan etika Islam

Dalam domain pendidikan, konsep teknologi alam sekitar dan tenaga semakin diberi penekanan melalui Pendidikan untuk Pembangunan Lestari (*Education for Sustainable Development, ESD*), yang bertujuan membentuk literasi saintifik, pemikiran sistem dan kesedaran ekologi dalam kalangan pelajar serta masyarakat (Leicht et al., 2018, Boeve-de Pauw et al., 2015). Literasi ini penting untuk menjadikan masyarakat lebih memahami hubungan antara teknologi, tingkah laku

manusia dan kesan terhadap alam sekitar. Justeru, pendidikan berperanan bukan sahaja memindahkan pengetahuan, tetapi turut membentuk nilai dan tindakan lestari yang mampu menyokong intervensi teknologi.

Dari perspektif moral dan etika Islam, konsep teknologi alam sekitar dan tenaga berakar pada prinsip *al-khalifah*, *al-mīzān* (keseimbangan), *al-wasatiyyah* (kesederhanaan) dan larangan *al-fasād* (kerosakan). Prinsip ini menegaskan bahawa segala interaksi manusia dengan alam perlu berpaksikan amanah dan tanggungjawab terhadap ciptaan Tuhan (Zuhdi et al., 2024). Sarjana Islam kontemporari turut menekankan bahawa krisis alam sekitar adalah krisis moral dan spiritual, justeru penyelesaian teknikal mesti digabungkan dengan nilai etika dan akhlak yang membimbing penggunaan teknologi secara beradab dan berhemah (Amri et al., 2022). Dengan itu, konsep teknologi dalam Islam bukan hanya berfungsi sebagai alat, tetapi sebagai instrumen memakmurkan bumi dan memelihara keseimbangannya. Secara keseluruhan, definisi teknologi alam sekitar dan tenaga melibatkan gabungan dimensi saintifik, pendidikan dan etika suatu pendekatan holistik yang diperlukan untuk menangani cabaran kelestarian masa kini. Pendekatan ini turut menunjukkan bahawa inovasi teknologi hanya dapat mencapai keberkesanan optimum apabila disepadukan dengan kesedaran moral, literasi masyarakat dan sokongan pendidikan transformatif.

3.0 CABARAN ALAM SEKITAR

Cabaran alam sekitar pada abad ke-21 terus meningkat akibat pembangunan ekonomi yang pesat, penggunaan sumber berlebihan dan gaya hidup manusia yang tidak selari dengan prinsip kelestarian. Interaksi kompleks antara pencemaran, perubahan iklim dan penyusutan sumber asli mencetuskan kesan berantai kepada ekosistem, kesihatan awam serta kesejahteraan global (Shakir et al., 2025a). Keadaan ini menunjukkan perlunya perubahan paradigma terhadap cara manusia mengurus sumber bumi, termasuk melalui pendidikan alam sekitar yang membina kesedaran, serta pemupukan nilai moral dan etika Islam dalam memandu tindakan. Bahagian ini menghuraikan enam cabaran utama yang saling berkaitan dalam membentuk landskap alam sekitar masa kini.

Bagi memberikan gambaran yang lebih menyeluruh, Jadual 1 merumuskan enam cabaran utama alam sekitar yang saling berkaitan, merangkumi dapatan kajian saintifik, implikasi terhadap kelestarian serta tafsiran moral dan etika Islam yang relevan. Jadual ini juga mengintegrasikan rujukan jurnal yang berindeks, memastikan analisis yang diketengahkan adalah berasaskan bukti dan selari dengan standard penulisan akademik. Bahagian ini seterusnya menghuraikan setiap cabaran secara lebih terperinci untuk memberi kefahaman mendalam mengenai isu-isu kritikal yang membentuk landskap alam sekitar masa kini.

Jadual 1: Ringkasan literatur cabaran alam sekitar: dapatan saintifik, implikasi kelestarian dan perspektif etika Islam

Cabaran Alam Sekitar	Dapatan Kajian Utama	Implikasi terhadap Kelestarian	Nilai / Interpretasi Moral & Islamik	Rujukan
Perubahan iklim dan pemanasan global	Peningkatan pelepasan gas rumah hijau (GHG) mempercepat pemanasan global, cuaca ekstrem, kenaikan paras laut dan gangguan ekosistem.	Mengancam keselamatan makanan, kesihatan manusia, ekosistem marin, dan kestabilan sosioekonomi global.	Menjaga keseimbangan alam adalah amanah; larangan melakukan <i>fasad</i> (kerosakan) menuntut mitigasi perubahan iklim.	(Lee et al., 2023)
Pencemaran udara	PM _{2.5} , NO _x , O ₃ dan Sebatian organik meruap (VOC) meningkatkan penyakit respiratori/kardiovaskular dan kematian pramatang.	Menurunkan kualiti hidup, produktiviti, dan meningkatkan kos perubatan jangka panjang.	Udara bersih adalah nikmat; mencemarkan udara bertentangan dengan etika tidak memudaratkan makhluk lain.	(Manisali dis et al., 2020)
Kekurangan dan pencemaran air	Tekanan air global meningkat akibat perubahan iklim, pertanian intensif, pembangunan, dan pencemaran bahan kimia.	Mengancam kesihatan, pertanian, ekosistem akuatik dan pembangunan komuniti.	Islam menekankan <i>al-wasatiyyah</i> (kesederhanaan) dan larangan <i>al-israf</i> (pembaziran); air adalah amanah kehidupan.	(Thomson et al., 2019)
Kehilangan biodiversiti	Kadar kepupusan meningkat akibat perubahan guna tanah, eksploitasi berlebihan, pencemaran dan perubahan iklim.	Menjejaskan perkhidmatan ekosistem (pendebungan, keseimbangan iklim, keselamatan makanan).	Menjaga kepelbagaian ciptaan Tuhan adalah tanggungjawab khalifah; larangan kerosakan alam.	(Díaz et al., 2019)
Pencemaran tanah	Logam berat, racun perosak dan sisa industri menyebabkan degradasi tanah dan risiko toksik dalam rantai makanan.	Mengancam keselamatan makanan, kesihatan manusia dan	Tanah perlu dipelihara sebagai amanah; konsep <i>al-isti'mar</i>	(Fan et al., 2019)

		kesuburan tanah jangka panjang.	menuntut pemuliharaan dan pemulihan.	
Pengurusan sisa tidak berkesan	Peningkatan sisa global, sisa tidak biodegradasi dan pengurusan lemah menyebabkan pencemaran tanah/air dan risiko kesihatan.	Meningkatkan beban ekologi, pelepasan gas rumah kaca dan kos negara; menjejaskan kesihatan awam.	Etika <i>al-taharah</i> (kebersihan) dan tanggungjawab sosial menuntut pengurusan sisa berhemah.	(Kaza et al., 2018)

3.1 Perubahan Iklim Dan Pemanasan Global

Peningkatan pelepasan gas rumah hijau (GHG) daripada pembakaran bahan api fosil telah menyumbang kepada kenaikan suhu global, peningkatan kejadian cuaca ekstrem, pencairan ais kutub dan kenaikan paras laut. Menurut Panel Antara Kerajaan mengenai Perubahan Iklim, tanpa usaha mitigasi drastik, suhu global berpotensi melebihi 2°C menjelang akhir abad ini, memberi kesan buruk terhadap ekosistem dan masyarakat (Lee et al., 2023). Kajian saintifik turut menunjukkan bahawa pengasidan lautan akibat peningkatan CO₂ atmosfera semakin mengancam biodiversiti marin, termasuk terumbu karang yang sangat sensitif terhadap perubahan kimia air laut (Gattuso et al., 2015, Hoegh-Guldberg et al., 2019). Fenomena seperti kebakaran hutan besar, taufan kuat dan gelombang haba ekstrem telah meningkat dengan ketara, menegaskan bahawa perubahan iklim bukan lagi isu masa depan tetapi realiti semasa yang memerlukan tindakan global segera (Kamada, 2024). Dari sudut Islam, menjaga keseimbangan iklim adalah tanggungjawab moral manusia sebagai *khalifah* untuk mengelakkan kerosakan (*al-fasad*) di bumi, selaras dengan prinsip menjaga kemaslahatan dan amanah terhadap alam sekitar.

3.2 Pencemaran Udara

Pencemaran udara berlaku apabila bahan pencemar seperti NO_x, SO₂, CO, ozon troposfera, VOCs dan zarah halus PM_{2.5} hadir pada kepekatan yang membahayakan kesihatan manusia dan ekosistem (Shakir et al., 2025a). Sumbernya merangkumi industri, pengangkutan, pembakaran terbuka dan proses fotokimia atmosfera. Kajian menunjukkan bahawa pendedahan kepada PM_{2.5} dan pencemar gas seperti NO₂ dan O₃ meningkatkan risiko penyakit respiratori, kardiovaskular serta kematian pramatang (Manisalidis et al., 2020, Lelieveld et al., 2019). Isu ini juga bersifat rentas sempadan kerana bahan pencemar boleh bergerak jauh mengikut dinamik atmosfera, menjadikannya berkait rapat dengan sektor tenaga dan pembangunan bandar (Chen et al., 2018). Pencemaran udara mengurangkan kualiti hidup, menjejaskan produktiviti ekonomi serta membebankan sistem kesihatan awam. Prinsip Islam mendorong penjagaan udara bersih sebagai nikmat yang tidak wajar dicemarkan, selaras dengan etika tidak memudaratkan makhluk lain (*la darar wa la dirar*) dan tanggungjawab manusia sebagai khalifah di bumi.

3.3 Kekurangan Air Dan Pencemaran Air

Kekurangan air berlaku apabila sumber air tawar tidak mencukupi untuk memenuhi permintaan, sering disebabkan pertumbuhan populasi, perubahan iklim, pengambilan air berlebihan dan penggunaan tidak efisien. Kajian menunjukkan bahawa perubahan iklim mempercepatkan tekanan air melalui kemarau, gangguan pola hujan dan peningkatan suhu yang menjejaskan ketersediaan air permukaan dan air tanah (Mishra et al., 2010, Famiglietti, 2014). Pada masa yang sama, pencemaran air melibatkan kemerosotan kualiti air akibat pembuangan nutrien, logam berat, farmaseutikal dan mikroplastik daripada aktiviti domestik, industri dan pertanian (Shakir et al., 2024a, Ali et al., 2019b, Eerkes-Medrano et al., 2015). Infrastruktur rawatan air yang tidak mencukupi memburukkan keadaan ini, mengancam kesihatan manusia dan kestabilan ekosistem akuatik. Menurut UNESCO (2023), lebih dua bilion penduduk dunia tinggal di kawasan bertekanan air, menjadikan isu ini antara cabaran global paling kritikal. Pengurusan air secara lestari selari dengan ajaran Islam tentang kesederhanaan (*al-wasatiyyah*), larangan pembaziran (*al-israf*) dan kewajipan menjaga sumber air sebagai asas kehidupan.

Kekurangan air timbul apabila permintaan melebihi ketersediaan sumber air tawar akibat pertumbuhan populasi, penggunaan tidak efisien, perubahan iklim dan pengurusan sumber yang lemah. Pencemaran air pula berlaku akibat pembuangan nutrien, logam berat, mikroplastik dan efluen industri yang tidak dirawat, mengakibatkan risiko toksik kepada manusia dan ekosistem (Sharma et al., 2017). Situasi ini menjejaskan kesihatan manusia, pertanian, bekalan air minum dan kestabilan ekosistem akuatik. Laporan UNESCO menganggarkan lebih dua bilion penduduk terjejas oleh tekanan air, menunjukkan keperluan kritikal pengurusan air yang mampan (Paquin et al., 2016). Dalam Islam, air merupakan anugerah asas kehidupan; prinsip *al-wasatiyyah* dan larangan pembaziran memperkukuh tuntutan agar sumber air diurus secara berhemah dan penuh amanah.

3.4 Kehilangan Biodiversiti

Kehilangan biodiversiti merangkumi kepelbagaian genetik, spesies dan ekosistem kini berlaku pada kadar yang membimbangkan akibat penebangan hutan, perubahan guna tanah, eksploitasi berlebihan, pencemaran dan perubahan iklim. Laporan IPBES menganggarkan bahawa lebih sejuta spesies berisiko pupus dalam beberapa dekad akan datang, menunjukkan skala krisis ekologi global (IPBES, 2019). Kajian saintifik turut menunjukkan bahawa kehilangan habitat dan perubahan iklim merupakan pemacu utama kemerosotan biodiversiti daratan dan marin (Díaz et al., 2019). Kepupusan spesies memberi kesan langsung kepada perkhidmatan ekosistem seperti pendebungaan, kawalan penyakit, keselamatan makanan dan kestabilan iklim. Kerosakan ini juga menjejaskan kesejahteraan manusia kerana ekosistem yang seimbang menjadi asas kepada kehidupan. Islam menekankan penjagaan ciptaan Tuhan sebagai tanda kebesaran-Nya dan melarang kemusnahan alam tanpa sebab yang sah, selaras dengan peranan manusia sebagai *khalifah* yang dipertanggungjawabkan untuk memelihara biodiversiti dan keseimbangan ekologi.

3.5 Pencemaran Tanah

Pencemaran tanah berpunca daripada pengumpulan logam berat, racun perosak, bahan kimia industri dan pelupusan sisa tidak terkawal. Ia menjejaskan kualiti tanah, mengurangkan produktiviti pertanian dan mewujudkan risiko melalui bioakumulasi toksik dalam rantai makanan. Kajian menunjukkan bahawa logam berat seperti kadmium, plumbum dan arsenik dapat terkumpul dalam tanaman dan memberi kesan kesihatan jangka panjang kepada manusia melalui biomagnifikasi (Ali et al., 2019a). Pencemaran residu kimia pertanian seperti racun perosak juga menyebabkan degradasi tanah dan mengganggu komuniti mikrob yang penting bagi kesuburan tanah (Silva et al., 2019). Selain itu, tanah tercemar menyumbang kepada peningkatan pelepasan gas rumah kaca, terutamanya nitrous oxide (N₂O), melalui gangguan proses biogeokimia (Reay et al., 2012). Pengurusan tanah lestari, rawatan sisa dan teknik bioremediasi perlu digiatkan untuk mengurangkan impak, dengan penggunaan teknologi seperti fitoremediasi, *biochar* dan agen mikrobiologi. Dalam ajaran Islam, menjaga tanah merupakan sebahagian daripada usaha *al-isti'mar* memakmurkan bumi secara bertanggungjawab dan larangan melakukan kerosakan (*al-fasad*), selari dengan prinsip amanah manusia sebagai khalifah di bumi ('Izz al-Dīn, 2000).

3.6 Pengurusan Sisa Yang Tidak Berkesan

Pengurusan sisa yang lemah, terutama dalam sektor industri dan perbandaran, menimbulkan ancaman besar kepada alam sekitar dan kesihatan awam. Pelupusan sisa toksik, pencemaran air larian serta bahan tidak biodegradasi membawa kesan jangka panjang terhadap kualiti tanah, sumber air dan ekosistem (Kaza et al., 2018, Abubakar et al., 2022). Bahan plastik dan mikroplastik yang kini ditemui pada hampir semua ekosistem daratan dan marin terus terkumpul dalam persekitaran dan mengakibatkan risiko ekotoksik kepada hidupan dan kesihatan manusia (Shalfoh et al., 2025). Di kawasan bandar, pengurusan sisa pepejal yang tidak efisien meningkatkan pelepasan gas rumah kaca seperti metana daripada tapak pelupusan, menyumbang kepada pemanasan global (Stanisavljević et al., 2012). Penyelesaian memerlukan peraturan lebih tegas, teknologi rawatan moden seperti waste-to-energy, bioremediasi dan circular economy, serta pendidikan masyarakat mengenai pengurangan sisa, kitar semula dan tanggungjawab sosial. Dalam Islam, konsep *al-taharah* menekankan kebersihan dan pengurusan sisa yang teratur sebagai sebahagian daripada kesejahteraan komuniti dan amanah manusia dalam menjaga bumi (Kamali, 2010).

4.0 CABARAN TENAGA

Sistem tenaga global kini berada pada persimpangan kritikal apabila pertumbuhan permintaan, keterbatasan sumber dan tekanan untuk mengurangkan impak alam sekitar saling bertembung. Sektor tenaga merupakan penyumbang terbesar pelepasan gas rumah kaca global, menjadikan transformasi sistem tenaga satu keperluan mendesak dalam agenda mitigasi perubahan iklim (Binhweel et al., 2025). Pada masa yang sama, isu ketidakadilan akses tenaga, ketidakcekapan

penggunaan, peningkatan kos, serta kerumitan mengintegrasikan tenaga boleh diperbaharui ke dalam rangkaian sedia ada menambah beban terhadap bentuk pembangunan konvensional. Cabaran-cabaran ini memperlihatkan bahawa penyelesaian teknikal sahaja tidak mencukupi, malah ia memerlukan kefahaman sistemik, dasar yang progresif, pembudayaan pendidikan tenaga yang efektif dan perubahan nilai masyarakat.

Bahagian ini menghuraikan lima cabaran utama sektor tenaga masa kini: kebergantungan berterusan kepada bahan api fosil, ketidaksempurnaan akses tenaga, ketidakcekapan tenaga, cabaran integrasi tenaga boleh diperbaharui, serta hubungan timbal balik antara tenaga dan air. Memahami setiap cabaran ini secara holistik bukan sahaja penting bagi perancangan dasar dan inovasi teknologi, tetapi juga untuk membentuk kesedaran moral dan etika dalam kalangan masyarakat, selaras dengan prinsip Islam yang menekankan kesederhanaan (*wasatiyyah*), amanah menjaga sumber, dan larangan pembaziran (*israf*). Perincian ringkas mengenai dapatan kajian terkini, implikasi terhadap kelestarian, serta interpretasi moral dan etika Islam berkaitan cabaran-cabaran ini dirumuskan dalam Jadual 2, bagi memberikan gambaran komprehensif tentang interaksi kompleks antara isu tenaga global dan keperluan transformasi sistem tenaga masa hadapan.

Jadual 2: Ringkasan Literatur Cabaran Tenaga Global

Cabaran Tenaga	Dapatan Kajian Utama	Implikasi terhadap Kelestarian	Nilai / Interpretasi Moral dan Islamik	Rujukan
Kebergantungan kepada bahan api fosil	Lebih 80% tenaga dunia masih bergantung pada fosil; pembakaran arang batu, minyak dan gas merupakan penyumbang terbesar CO ₂ global.	Meningkatkan pemanasan global, pencemaran udara, risiko kesihatan, serta ketidakstabilan tenaga jangka panjang.	Islam menolak kerosakan (<i>al-fasad</i>) dan menuntut penjagaan bumi; peralihan kepada sumber bersih selari dengan konsep amanah.	(Raimi et al., 2024)
Akses tenaga dan ketidaksempurnaan	675 juta penduduk masih tiada elektrik; tenaga tidak mencukupi menjejaskan pendidikan, kesihatan dan ekonomi luar bandar.	Menghalang pembangunan insan, memperluas jurang sosial dan meningkatkan kemiskinan tenaga.	Islam menekankan keadilan sosial (<i>al-'adl</i>) dan pemenuhan hak asasi manusia termasuk akses kepada tenaga yang selamat.	(Pachauri et al., 2021)
Ketidakcekapan tenaga	Kehilangan tenaga berlaku sepanjang rantai penajaan, penghantaran dan penggunaan	Meningkatkan pelepasan karbon, menambah kos operasi dan	Prinsip <i>al-wasatiyyah</i> (kesederhanaan) dan larangan pembaziran (<i>al-</i>	(Liu et al., 2022)

	menyebabkan pembaziran sumber & kos tinggi.	menjejaskan keselamatan tenaga negara.	israf) menggalakkan penggunaan tenaga secara berhemah.	
Integrasi tenaga boleh diperbaharui	Variabiliti sumber seperti solar/angin menyukarkan integrasi ke grid; teknologi simpanan tenaga penting untuk kestabilan sistem.	Meningkatkan keselamatan tenaga, mengurangkan pelepasan karbon, tetapi memerlukan infrastruktur dan kos modal tinggi.	Islam menggalakkan penggunaan sumber bersih dan lestari sebagai sebahagian daripada memelihara ciptaan Tuhan.	(Beaudin et al., 2010)
Hubungan tenaga–air (<i>energy-water nexus</i>)	Pengeluaran tenaga menggunakan air dalam jumlah besar; rawatan/pengepaman air memerlukan tenaga tinggi.	Risiko krisis air, tekanan kepada pertanian dan tenaga, serta kos meningkat bagi negara membangun.	Mengurus air dan tenaga secara berhemah selari dengan ajaran Islam mengenai amanah menjaga sumber dan menghindari pembaziran.	(Wang et al., 2023)

4.1 Kebergantungan Kepada Bahan Api

Sistem tenaga dunia masih sangat bergantung kepada bahan api fosil seperti arang batu, minyak dan gas asli, yang secara kolektif merangkumi lebih 80% permintaan tenaga global (Spencer et al., 2018). Kebergantungan ini mencetuskan dua krisis utama: pertama, ia menjadi penyumbang terbesar pelepasan gas rumah kaca, sekali gus mempercepatkan pemanasan global; kedua, sifatnya yang tidak boleh diperbaharui mengancam keselamatan tenaga jangka panjang. Pembakaran arang batu bukan sahaja menghasilkan CO₂ dalam jumlah besar, tetapi turut melepaskan pmakalah halus yang mengurangkan kualiti udara dan meningkatkan risiko penyakit respiratori (Tong et al., 2020). Eksploitasi minyak pula sering dikaitkan dengan pencemaran marin dan kehilangan biodiversiti akibat tumpahan minyak, manakala gas asli walaupun dianggap lebih bersih, tetap melepaskan metana iaitu gas rumah kaca yang 28–34 kali lebih poten berbanding CO₂ dari segi potensi pemanasan global (Saunois et al., 2020).

Peralihan kepada tenaga boleh diperbaharui seperti solar, angin dan hidro kini menjadi keutamaan global selari dengan agenda pembangunan lestari (Alsaadi et al., 2025). Walaupun kos teknologi semakin kompetitif, transformasi tenaga berdepan cabaran seperti integrasi ke dalam grid, kos modal permulaan yang tinggi, keperluan simpanan tenaga, serta rintangan institusi dan dasar (Bogdanov et al., 2021). Oleh itu, mekanisme dasar seperti harga karbon, pengurangan subsidi bahan api fosil dan

pelaburan dalam inovasi tenaga bersih amat penting untuk mempercepatkan peralihan.

Dari perspektif Islam, pergantungan berterusan kepada sumber yang mencemarkan dan merosakkan alam bertentangan dengan prinsip amanah dan larangan melakukan kerosakan (*al-fasad*) di bumi. Usaha beralih kepada sumber tenaga bersih mencerminkan tanggungjawab manusia sebagai *khalifah* untuk memelihara keseimbangan dan kesejahteraan bumi (Kamali, 2010).

4.2 Akses Tenaga Dan Ketidaksamarataan

Akses tenaga merupakan isu global yang kritikal, dengan anggaran 675 juta penduduk masih hidup tanpa elektrik pada tahun 2021, terutamanya di Sub-Sahara Afrika dan Asia Selatan (Zapata et al., 2025). Kekurangan akses tenaga moden menghalang pembangunan ekonomi, menjejaskan produktiviti dan mengehendkan penyampaian perkhidmatan asas seperti pendidikan, kesihatan dan keselamatan. Sebagai contoh, ketiadaan elektrik menyukarkan pelajar untuk belajar pada waktu malam, manakala fasiliti kesihatan berdepan kesukaran menyimpan vaksin, menjalankan pembedahan kecil dan mengoperasikan peralatan perubatan kritikal (Blimpo et al., 2019). Ketidaksamarataan tenaga juga memberi kesan ketara kepada golongan rentan terutamanya wanita dan kanak-kanak yang masih bergantung kepada bahan bakar tradisional seperti kayu api dan arang, yang mengeluarkan asap berbahaya dan meningkatkan risiko penyakit pernafasan (Boudewijns et al., 2022).

Usaha menangani isu ini merupakan komponen utama dalam mencapai Matlamat Pembangunan Lestari SDG 7: Tenaga Bersih dan Mampu Milik. Penyelesaian inklusif seperti mikrogrid solar, sistem tenaga boleh diperbaharui komuniti, dan penjana hibrid berskala kecil telah terbukti berkesan dalam meningkatkan kesejahteraan sosial, memperkukuh ekonomi tempatan dan mengurangkan kebergantungan kepada bahan api fosil (Chandratreya, 2025, Riffat et al., 2025a). Pendekatan ini bukan sahaja menyediakan tenaga yang lebih stabil, tetapi juga mengurangkan kos operasi jangka panjang dan membuka peluang keusahawanan dalam komuniti luar bandar.

Dari perspektif Islam, akses kepada tenaga moden yang selamat dan bersih adalah selaras dengan prinsip keadilan sosial (*al-'adl*), pemeliharaan nyawa (*hifz al-nafs*), dan pemenuhan keperluan asas manusia. Penyediaan tenaga yang adil dan lestari mencerminkan tanggungjawab kolektif untuk memastikan kesejahteraan masyarakat, terutama golongan yang paling memerlukan.

4.3 Ketidakekapan Tenaga

Ketidakekapan tenaga berlaku di sepanjang rantaian tenaga bermula daripada penjanaan, penghantaran hinggalah penggunaan akhir dan menjadi salah satu penyumbang utama kepada pembaziran tenaga serta peningkatan pelepasan karbon global. Ketidakekapan ini memberi kesan ekonomi kerana ia meningkatkan kos operasi, mengurangkan kecekapan sistem dan memerlukan lebih banyak tenaga untuk memenuhi permintaan (Barrett et al., 2022). Dalam sektor penjanaan, kehilangan tenaga akibat teknologi usang dan proses pembakaran yang tidak cekap menyumbang kepada pelepasan CO₂ yang lebih tinggi. Pada peringkat

penghantaran, kehilangan tenaga melalui talian transmisi yang panjang dan infrastruktur lapuk turut memperburuk keadaan.

Teknologi moden seperti grid pintar (*smart grid*) berupaya mengimbangi permintaan dan penawaran secara masa nyata, mengurangkan kehilangan tenaga dan meningkatkan kebolehpercayaan bekalan (Garcia-Teruel et al., 2021). Di peringkat penggunaan akhir, peralatan cekap tenaga seperti lampu LED, peralatan elektrik berlabel kecekapan tinggi, dan sistem HVAC generasi baharu terbukti mampu mengurangkan penggunaan tenaga secara signifikan. Dalam sektor bangunan, pendekatan reka bentuk mampan termasuk penggunaan penebat berprestasi tinggi, pengudaraan semula jadi, tenaga boleh diperbaharui, dan penyejukan pasif menyumbang kepada pengurangan beban tenaga dalam jangka masa panjang (JI et al., 2018). Oleh itu, peningkatan kecekapan tenaga bukan sahaja mengurangkan pelepasan karbon dan kos operasi, tetapi juga meningkatkan keselamatan tenaga dengan mengurangkan kebergantungan terhadap bahan api fosil.

Dari perspektif Islam, amalan meningkatkan kecekapan tenaga selari dengan prinsip *wasatiyyah* (kesederhanaan) dan larangan pembaziran (*israf*), yang menekankan penggunaan sumber secara berhemah dan optimum. Mengelakkan pembaziran tenaga adalah sebahagian daripada tuntutan etika menjaga amanah terhadap sumber alam, selaras dengan peranan manusia sebagai *khalifah* yang bertanggungjawab memelihara kelestarian bumi (Kamali, 2010).

4.4 Cabaran Integrasi Tenaga Boleh Diperbaharui

Integrasi sumber tenaga boleh diperbaharui seperti solar dan angin ke dalam sistem tenaga sedia ada merupakan komponen utama dalam peralihan tenaga global, namun proses ini berdepan pelbagai cabaran teknikal dan operasi. Sifat tenaga boleh diperbaharui yang tidak menentu, bergantung kepada variasi cuaca, musim dan Lokasi menimbulkan isu kebolehpercayaan dan kestabilan grid, terutama apabila penjanaan tenaga meningkat pada waktu tertentu tetapi permintaan rendah (Bogdanov et al., 2021). Ketidaktentuan ini menyebabkan keperluan kepada mekanisme penyeimbangan sistem yang lebih canggih.

Teknologi penyimpanan tenaga memainkan peranan yang semakin penting dalam menangani isu ini. Bateri litium-ion kini merupakan pilihan dominan kerana kecekapan tinggi, kos yang semakin menurun dan fleksibiliti dalam pelbagai aplikasi. Selain itu, penyimpanan tenaga berasaskan hidrogen, teknologi *power-to-gas*, serta sistem hidro pam (*pumped hydro storage*) menawarkan kapasiti penyimpanan berskala lebih besar untuk menyokong grid dalam jangka masa panjang (Worku, 2022). Di samping itu, penggunaan grid pintar membolehkan pemantauan masa nyata, pengoptimuman aliran tenaga, pengurusan permintaan dan integrasi pelbagai sumber tenaga, sekali gus meningkatkan kebolehpercayaan sistem tenaga keseluruhan (Bitar et al., 2011).

Sistem tenaga terdesentralisasi seperti mikrogrid dan komuniti tenaga (*energy communities*) turut memberikan penyelesaian penting dengan mempelbagaikan saluran penjanaan tenaga, mengurangkan kebergantungan kepada grid pusat dan mengurangkan kehilangan transmisi. Pendekatan ini bukan sahaja mengukuhkan daya tahan tenaga setempat, tetapi juga meningkatkan akses kepada tenaga bersih bagi kawasan terpencil atau kurang membangun (Nasir et al., 2018).

Secara keseluruhan, integrasi tenaga boleh diperbaharui bukan sahaja mengurangkan kebergantungan kepada bahan api fosil, tetapi turut meningkatkan keselamatan tenaga, mengurangkan pelepasan karbon dan menyokong pencapaian sasaran iklim global. Dari perspektif pendidikan, proses transformasi ini membuka ruang besar untuk pembangunan kompetensi tenaga hijau, inovasi teknologi dan literasi tenaga dalam kalangan masyarakat. Dalam perspektif Islam pula, penggunaan sumber alam yang bersih dan lestari selari dengan prinsip pemeliharaan ciptaan Tuhan, larangan melakukan *al-fasad* (kerosakan), dan tuntutan untuk mengurus sumber secara berhemah sebagai sebahagian daripada amanah sebagai *khalifah* di bumi (Kamali, 2010).

4.5 Hubungan Tenaga-Air

Pengeluaran tenaga sangat bergantung kepada sumber air, terutamanya dalam proses penyejukan turbin, pengekstrakan bahan api fosil dan pemprosesan bahan api, menjadikan sektor tenaga antara pengguna air terbesar di dunia. Kebergantungan tinggi ini meningkatkan risiko bagi kawasan yang mengalami tekanan air kerana persaingan antara sektor tenaga, pertanian dan kegunaan domestik boleh menjejaskan keselamatan sumber air dan kecekapan operasi tenaga (Chilvers et al., 2017, Riffat et al., 2025b). Pada masa yang sama, sektor bekalan air sendiri bergantung kepada tenaga dalam jumlah besar untuk tujuan pengepaman, rawatan dan penyahgaraman; sebagai contoh, loji penyahgaraman moden menggunakan tenaga yang sangat tinggi, sekali gus memberi kesan kepada kos operasi dan pelepasan karbon (Caldera et al., 2017).

Hubungan dua hala ini sering dirujuk sebagai *energy-water nexus* menunjukkan bahawa gangguan dalam satu sektor boleh memberi kesan langsung terhadap sektor lain. Justeru, peningkatan kecekapan dalam kedua-dua sektor perlu diberikan keutamaan. Teknologi seperti sistem penyejukan kering, kitaran air tertutup, dan penyelesaian rawatan air berasaskan tenaga rendah telah dikenal pasti mampu mengurangkan intensiti penggunaan air dalam penjanaan tenaga, manakala penyelesaian berasaskan alam (*nature-based solutions*) menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan daya tahan sistem air (Zheng et al., 2016). Di samping itu, sumber tenaga boleh diperbaharui seperti solar fotovoltaiik dan angin hampir tidak memerlukan air untuk operasi, menjadikannya alternatif yang lebih lestari dan sesuai untuk kawasan yang berdepan krisis air berpanjangan.

Dari perspektif Islam, pengurusan air dan tenaga secara berhemah selaras dengan ajaran untuk mengelakkan pembaziran (*al-israf*) dan menjaga sumber alam sebagai amanah. Prinsip maqasid syariah, khususnya *hifz al-bi'ah* (pemeliharaan alam sekitar) dan *hifz al-nafs* (penjagaan nyawa), menggariskan kepentingan melindungi sumber air dan tenaga demi kesejahteraan masyarakat dan generasi masa depan (Kamali, 2010). Konsep *al-maslahah* menekankan kepentingan keputusan dasar yang memaksimumkan manfaat umum, manakala nilai *al-itsar* (mendahulukan orang lain) menggesa pembuat dasar memberi keutamaan tenaga dan air kepada komuniti yang lebih rentan. Selain itu, karya sarjana seperti ('Izz al-Dīn, 2000) dan (Abdul-Matin, 2010) menegaskan bahawa menjaga keseimbangan ekologi merupakan sebahagian daripada peranan manusia sebagai *khalifah* di bumi dan larangan melakukan kerosakan (*al-fasad*) terhadap ciptaan Tuhan.

5.0 PERANAN TEKNOLOGI DALAM MENANGANI ISU KELESTARIAN GLOBAL: PERSPEKTIF SAINTIFIK, PENDIDIKAN DAN ETIKA ISLAM

Teknologi moden memainkan peranan penting dalam menghadapi cabaran kelestarian global yang semakin kritikal, termasuk perubahan iklim, kekurangan sumber, pencemaran dan peningkatan permintaan tenaga. Melalui inovasi dalam tenaga boleh diperbaharui, sistem tenaga pintar, bahan lestari dan teknologi perlindungan alam sekitar, kemajuan sains dan kejuruteraan kini menjadi asas dalam memacu transformasi ke arah pembangunan rendah karbon. Namun begitu, teknologi sahaja tidak mencukupi. Penyelesaiannya menuntut integrasi pendidikan yang membina literasi kelestarian serta pemerkasaan nilai moral dan etika Islam yang membimbing manusia menggunakan teknologi dengan penuh tanggungjawab. Bahagian ini menghuraikan peranan teknologi dari tiga dimensi utama: saintifik, pendidikan dan etika Islam.

5.1 Dimensi Saintifik: Teknologi Sebagai Pemacu Penyelesaian Kelestarian

Peralihan kepada sumber tenaga boleh diperbaharui merupakan keperluan saintifik yang mendesak bagi mengurangkan pelepasan karbon dan menangani perubahan iklim. Kemajuan teknologi fotovolta (PV), turbin angin luar pesisir, tenaga hidro berskala kecil serta tenaga bio telah meningkatkan kapasiti penjanaan tenaga bersih secara global (Riffat et al., 2025c). Walau bagaimanapun, sifat tidak menentu tenaga boleh diperbaharui menuntut pembangunan sistem penyimpanan tenaga berprestasi tinggi bagi memastikan kestabilan grid. Teknologi penyimpanan tenaga moden seperti bateri litium-ion, bateri keadaan pepejal dan penyimpanan hidrogen memainkan peranan penting dalam mengekalkan kebolehpercayaan sistem tenaga (Dunn et al., 2011).

Selain sektor tenaga, teknologi bahan lestari menjadi tunjang utama dalam pembangunan ekonomi hijau. Inovasi dalam polimer biodegradasi, komposit kitar semula dan bahan berasaskan tumbuhan telah mengurangkan pergantungan kepada sumber tidak boleh diperbaharui, sekali gus mengurangkan kesan alam sekitar sepanjang kitar hayat produk. Kajian terkini menunjukkan perkembangan pesat dalam teknologi biopolimer dan bahan mampan yang berpotensi menggantikan plastik konvensional tanpa menjejaskan prestasi mekanikal (Shakir et al., 2025c). Dalam industri pembinaan, penggunaan konkrit geopolimer, bahan penambat berasaskan bio serta aplikasi teknologi nano membuka ruang kepada pembinaan bangunan yang lebih cekap tenaga dan mempunyai jejak karbon yang jauh lebih rendah.

Teknologi pemuliharaan air dan alam sekitar turut menyumbang kepada penyelesaian kelestarian global. Sistem rawatan air berkemajuan seperti membran nanofiltrasi, osmosis songsang dan penapisan berasaskan bahan nano mampu menyingkirkan bahan pencemar kompleks, meningkatkan kualiti air dan mengurangkan risiko pencemaran. Penggunaan kecerdasan buatan (AI) dalam pemantauan kualiti air pula membolehkan pengesanan awal bahan pencemar serta tindak balas pengurusan sumber yang lebih berkesan (Bhardwaj et al., 2022, Shakir et al., 2025c). Dalam pengurusan sisa, teknologi sisa-ke-tenaga seperti pencernaan

anaerobik dan gasifikasi menukarkan sisa organik kepada tenaga boleh diperbaharui, manakala bioremediasi menggunakan mikroorganisma terbukti efektif dalam menguraikan bahan toksik dan memulihkan ekosistem yang terjejas.

Secara keseluruhannya, inovasi saintifik dalam tenaga bersih, bahan lestari, pemuliharaan air dan pengurusan sisa membuktikan bahawa teknologi berfungsi sebagai pemacu utama dalam usaha mengimbangi keperluan pembangunan manusia dengan kelestarian ekologi. Teknologi bukan sahaja menawarkan penyelesaian praktikal terhadap krisis alam sekitar, tetapi juga membuka ruang kepada model pembangunan baharu yang lebih berdaya tahan dan rendah karbon.

5.2 Dimensi Pendidikan: Pembinaan Literasi Kelestarian Melalui Sains Dan Teknologi

Pendidikan merupakan komponen penting yang memastikan inovasi teknologi bukan sahaja difahami secara konseptual, tetapi juga diamalkan secara lestari dalam masyarakat. Pembangunan Pendidikan Kelestarian (*Education for Sustainable Development, ESD*) menekankan pembentukan kemahiran saintifik, pemikiran sistem, penyelesaian masalah, dan literasi ekologi yang membolehkan pelajar memahami hubungan antara teknologi, alam sekitar dan masyarakat. Pendidikan sedemikian tidak hanya menyampaikan pengetahuan, tetapi membentuk kompetensi pelajar untuk membuat keputusan berasaskan bukti, menilai impak teknologi terhadap alam sekitar, dan merangka strategi penggunaan sumber yang mampan dalam kehidupan harian.

Pendekatan pedagogi moden seperti Pembelajaran Berasaskan Projek (*Project-Based Learning, PBL*), simulasi sistem tenaga pintar, penggunaan makmal tenaga boleh diperbaharui, serta kurikulum STEM yang terintegrasi dengan isu kelestarian terbukti dapat meningkatkan kesedaran dan kefahaman pelajar mengenai hubungan kompleks antara pembangunan teknologi dan kelestarian sumber (Wiek et al., 2011). Contohnya, latihan merancang dan menguji model grid tenaga pintar, audit tenaga sekolah, atau kajian kes penggunaan tenaga boleh diperbaharui memberi pengalaman pembelajaran langsung yang memupuk pemikiran kritikal, kreativiti dan tanggungjawab sosial.

Integrasi teknologi digital dalam pengajaran turut memperkukuh literasi kelestarian. Penggunaan sensor tenaga, sistem pemantauan Internet Kebendaan (IoT) dan aplikasi analitik data memberikan gambaran masa nyata tentang corak penggunaan tenaga dan kesannya terhadap alam sekitar, membolehkan pelajar menilai data sebenar dan mencadangkan strategi pengurangan penggunaan. Kajian juga menunjukkan bahawa pembelajaran berasaskan data meningkatkan kompetensi saintifik pelajar serta memupuk kesedaran tentang kepentingan penggunaan teknologi secara bertanggungjawab (Yasmeen et al., 2024).

Pendidikan kelestarian menjadi lebih bermakna apabila teori saintifik dipadankan dengan aplikasi praktikal yang membawa kepada perubahan tingkah laku jangka panjang, seperti penggunaan tenaga cekap, pengurangan sisa, pengurusan air yang berhemah, dan kebiasaan memilih produk mesra alam. Dengan demikian, pendidikan tidak hanya mendorong pemahaman saintifik, tetapi turut menyokong pembentukan budaya masyarakat yang prihatin terhadap alam sekitar.

5.3 Dimensi Etika Islam: Membimbing Penggunaan Teknologi Secara Beradab Dan Bertanggungjawab

Dalam perspektif Islam, teknologi bukan sekadar alat teknikal yang neutral, tetapi amanah (*amanah al-taklīfiyyah*) yang wajib digunakan untuk memakmurkan bumi (*isti'mār al-arḍ*) dan mengekalkan keseimbangannya. Prinsip *al-khalifah* menegaskan bahawa manusia dipertanggungjawabkan untuk mentadbir alam dengan penuh hikmah, manakala konsep *al-mizān* (keseimbangan) dan *al-wasatiyyah* (kesederhanaan) memberikan panduan moral bagi mengelakkan eksploitasi sumber secara berlebihan. Larangan *al-israf* (pembaziran) dan *fasad* (kerosakan) pula menekankan bahawa teknologi tidak boleh digunakan dengan cara yang membawa kemudaratan kepada ekosistem, komuniti atau generasi masa depan. (Nasr, 1968) menegaskan bahawa krisis alam sekitar moden berpunca daripada krisis spiritual manusia yang memisahkan sains daripada nilai ketuhanan, menjadikan etika Islam penting dalam mengembalikan keseimbangan hubungan manusia–alam. Teknologi tenaga bersih, sistem rawatan air, inovasi kitar semula dan bioteknologi pemulihan alam merupakan contoh aplikatif yang selaras dengan nilai Islam kerana ia memperbaiki kerosakan dan meningkatkan kesejahteraan manusia. Pandangan sarjana Islam seperti ('Izz al-Dīn, 2000) dan (Foltz, 2003) menekankan bahawa etika alam sekitar Islam memberi rangka kerja moral yang menyokong penggunaan teknologi yang berteraskan tanggungjawab, keadilan dan penjagaan ciptaan Tuhan.

Dalam konteks pendidikan, penerapan nilai Islam dalam pembelajaran STEM dan kelestarian membantu membentuk pelajar yang bukan sahaja kompeten dari segi teknikal, tetapi juga memiliki kompas moral dalam membuat keputusan berkaitan sains, teknologi dan alam sekitar. Penggabungan sains dan etika Islam menghasilkan pendekatan holistik yang memupuk generasi pemimpin yang adil, beretika dan prihatin terhadap masa depan bumi.

Dalam perspektif Islam, teknologi bukan sekadar alat neutral, tetapi amanah (*amanah al-taklīfiyyah*) yang mesti digunakan dengan penuh tanggungjawab untuk memakmurkan bumi (*isti'mār al-arḍ*) dan menjaga keseimbangannya. Prinsip *al-khalifah* menegaskan kedudukan manusia sebagai pengurus bumi yang dipertanggungjawabkan untuk memastikan pembangunan tidak membawa kepada kerosakan (*al-fasad*) atau penindasan terhadap manusia dan alam. Konsep *al-mizān* (keseimbangan) dan *al-wasatiyyah* (kesederhanaan) memberi garis panduan moral yang jelas untuk mengelakkan eksploitasi berlebihan, manakala larangan *al-israf* (pembaziran) membentuk etika penggunaan sumber yang berhemah. (Sanjotis, 2012) menunjukkan bagaimana komuniti Muslim dapat memupuk etika teknologi lestari melalui amalan keagamaan dan budaya yang menekankan penjagaan ciptaan Tuhan. Kesemua prinsip ini menyokong penggunaan teknologi secara beradab, adil dan lestari, selaras dengan maqasid syariah dalam memelihara nyawa, akal, harta, keturunan dan alam sekitar.

Aplikasi teknologi moden seperti tenaga bersih, sistem rawatan air, inovasi kitar semula, pertanian pintar serta bioteknologi pemulihan alam merupakan contoh penyelesaian yang memenuhi aspirasi etika Islam kerana ia memperbaiki kerosakan dan meningkatkan kesejahteraan manusia. Teknologi penjimatan tenaga, tenaga boleh diperbaharui, dan pengurusan sisa mesra alam adalah seiring dengan usaha *al-islāh* iaitu memperbetulkan dan memulihkan bumi daripada kerosakan yang

disebabkan oleh manusia sendiri. Pandangan sarjana Islam kontemporari seperti ('Izz al-Dīn, 2000) dan (Foltz, 2003) menegaskan bahawa etika alam sekitar Islam bukan sekadar moral tambahan, tetapi satu kerangka epistemologi yang mengintegrasikan spiritualiti, sains dan tindakan praktikal bagi menjaga keseimbangan ekologi. Kajian baharu juga menunjukkan bahawa prinsip Islam seperti *al-maslahah* (kebaikan umum), *al-amanah*, dan *al-'adālah* (keadilan) menjadi asas penting dalam membangunkan kerangka teknologi lestari dalam konteks masyarakat Muslim moden (Yasmeen et al., 2024).

Dalam konteks pendidikan, pengintegrasian nilai Islam dalam pembelajaran STEM dan kelestarian memainkan peranan penting dalam membentuk pelajar yang bukan sahaja cemerlang dari segi teknikal, tetapi juga memiliki kompas moral dalam membuat keputusan berkaitan sains, teknologi dan alam sekitar. Pendidikan holistik yang menggabungkan prinsip syariah dan pengetahuan saintifik membantu pelajar memahami hubungan antara tindakan manusia, impak ekologi dan tanggungjawab spiritual terhadap ciptaan Tuhan. Pendekatan ini menyokong pembangunan generasi pemimpin yang adil, beretika, dan prihatin terhadap masa depan bumi, sejajar dengan visi pendidikan Islam yang menekankan pembangunan insan secara seimbang dan harmoni.

6.0 KESIMPULAN

Teknologi alam sekitar dan tenaga semakin menjadi tonggak utama dalam usaha global menangani perubahan iklim, pencemaran dan penyusutan sumber asli. Kemajuan dalam tenaga boleh diperbaharui, bahan lestari, teknologi pintar dan inovasi pemuliharaan alam sekitar membuka peluang besar untuk mengurangkan impak ekologi serta menyokong peralihan ke arah pembangunan rendah karbon. Walau bagaimanapun, keberkesanan teknologi ini tidak bergantung kepada kemajuan saintifik semata-mata, sebaliknya memerlukan sokongan pendidikan yang membina literasi kelestarian, pemikiran sistem dan keupayaan membuat keputusan yang bertanggungjawab. Melalui integrasi pendidikan berasaskan STEM, pembelajaran berasaskan pengalaman dan penggunaan teknologi digital, masyarakat dapat memahami hubungan yang kompleks antara manusia, teknologi dan alam sekitar. Dalam tradisi intelektual Islam, prinsip *al-khalifah*, *al-mizan*, *al-wasatiyyah* dan larangan *al-israf* menyediakan kerangka etika yang membimbing penggunaan teknologi secara beradab, adil dan lestari. Secara keseluruhannya, sinergi antara kemajuan sains, pendidikan yang berkesan dan etika Islam berteraskan amanah merupakan asas penting dalam membentuk masyarakat yang seimbang serta memastikan pemeliharaan bumi untuk kesejahteraan generasi masa kini dan akan datang.

Penghargaan

Penyelidik ingin merakamkan ucapan terima kasih kepada Geran Bridging dengan Nombor Projek: R501-LR-RND003-0000002092-0000 kerana menyediakan dana untuk penyelidikan yang dijalankan.

Sumbangan Pengarang

Mardiana Idayu Ahmad memimpin pembangunan konsep kajian, merangka kerangka teori, menulis bahagian pengenalan dan perbincangan utama, melakukan semakan kandungan keseluruhan, serta melaksanakan penyuntingan draf akhir sebelum penghantaran kepada penerbit.

Nor Wardah Mohamad Senusi terlibat dalam pengumpulan dan analisis literatur, penulisan bahagian berkaitan teknologi alam sekitar dan tenaga lestari, serta memastikan keselarasan gaya penulisan dan ketepatan fakta dalam manuskrip.

Mohammad Aliff Shakir menyumbang dalam penyusunan struktur perbincangan, penulisan bahagian yang berkaitan dengan pendidikan dan kelestarian, serta menjalankan semakan teknikal termasuk pengemaskinian rujukan terkini.

Abdul Khalil H.P.S. memberikan kepakaran dalam bidang teknologi bahan dan biokomposit, menyemak kesahihan saintifik kandungan, serta menyumbang kepada pengayaan perbincangan mengenai aplikasi teknologi hijau dan implikasi praktikalnya.

Mohd Shukri Hanafi menyumbang secara signifikan dalam bahagian etika Islam, termasuk analisis nilai, penulisan bahagian berkaitan prinsip moral dan kerangka etika, serta semakan akademik terhadap integrasi perspektif syariah dalam isu kelestarian.

Penolakan Tuntutan

Manuskrip ini belum diterbitkan di tempat lain dan semua penulis telah bersetuju dengan penyerahannya dan mengisytiharkan tiada konflik kepentingan pada manuskrip.

RUJUKAN

- Abdelghany, M. B., Shafiquurrahman, A., Al-Durra, A., Mohamed, M., Hu, J., Vaccaro, A., Gao, F. & El Moursi, M. S. (2026) Hydrogen energy systems for decarbonizing smart cities and industrial applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116370.
- Abdul-Matin, I. 2010. *Green Deen: What Islam teaches about protecting the planet*, Berrett-Koehler Publishers.
- Abubakar, I. R., Maniruzzaman, K. M., Dano, U. L., Alshihri, F. S., Alshammari, M. S., Ahmed, S. M. S., Al-Gehlani, W. a. G. & Alrawaf, T. I. (2022) Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global South. *International journal of environmental research and public health*, 19, 12717.
- Al Khaffaf, I., Tamimi, A. & Ahmed, V. (2024) Pathways to carbon neutrality: A review of strategies and technologies across sectors. *Energies*, 17, 6129.
- Ali, H., Khan, E. & Ilahi, I. (2019a) Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1-14.

- Ali, H., Khan, E. & Ilahi, I. (2019b) Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019, 6730305.
- Alsaadi, S., Ahmad, M. I. & Shakir, M. A. (2025) Kinetics and thermodynamics study of lipid extraction from *Camelus dromedarius* fat waste and feedstock application in biodiesel production. *Discover Sustainability*, 6, 1102.
- Amri, S. a. a. M. & Mohd, R. A. (2022) A Review on Islamic Environmental Ethics: A Solution to Environmental Issues of Science and Technology. *Jurnal Islam Dan Masyarakat Kontemporari*, 23, 39-53.
- Apriani, D., Williams, A., Rahardja, U., Khoirunisa, A. & Avionita, S. (2021) The use of science technology in islamic practices and rules in the past now and the future. *International Journal of Cyber and IT Service Management*, 1, 48-64.
- Barrett, J., Pye, S., Betts-Davies, S., Broad, O., Price, J., Eyre, N., Anable, J., Brand, C., Bennett, G. & Carr-Whitworth, R. (2022) Energy demand reduction options for meeting national zero-emission targets in the United Kingdom. *Nature energy*, 7, 726-735.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A. & Rosehart, W. (2010) Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review. *Energy for sustainable development*, 14, 302-314.
- Bhardwaj, A., Dagar, V., Khan, M. O., Aggarwal, A., Alvarado, R., Kumar, M., Irfan, M. & Proshad, R. (2022) Smart IoT and machine learning-based framework for water quality assessment and device component monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 46018-46036.
- Binhweel, F., Ahmad, M. I., Hps, A. K. & Shakir, M. A. (2025) Biodiesel Production from *Ulva lactuca*: Insights into Kinetic and Thermodynamic Evaluation of Lipid Transesterification. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103856.
- Bitar, E., Khargonekar, P. P. & Poolla, K. (2011) Systems and control opportunities in the integration of renewable energy into the smart grid. *IFAC Proceedings Volumes*, 44, 4927-4932.
- Blimpo, M. P. & Cosgrove-Davies, M. 2019. *Electricity access in Sub-Saharan Africa: Uptake, reliability, and complementary factors for economic impact*, World Bank Publications.
- Boeve-De Pauw, J., Gericke, N., Olsson, D. & Berglund, T. (2015) The effectiveness of education for sustainable development. *Sustainability*, 7, 15693-15717.
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J. & Barbosa, L. D. S. N. S. (2021) Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467.
- Boudewijns, E. A., Trucchi, M., Van Der Kleij, R. M., Vermond, D., Hoffman, C. M., Chavannes, N. H., Van Schayck, O. C., Kirenga, B. & Brakema, E. A. (2022) Facilitators and barriers to the implementation of improved solid fuel cookstoves and clean fuels in low-income and middle-income countries: an umbrella review. *The Lancet Planetary Health*, 6, e601-e612.

- Caldera, U. & Breyer, C. (2017) Learning curve for seawater reverse osmosis desalination plants: capital cost trend of the past, present, and future. *Water Resources Research*, 53, 10523-10538.
- Chandratreya, A. (2025) The Role of Renewable Energy in Promoting Social Equity and Inclusive Economic Growth. *Renewable Energy and the Economic Welfare of Society*, 183-212.
- Chen, Q. & Taylor, D. (2018) Transboundary atmospheric pollution in Southeast Asia: current methods, limitations and future developments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48, 997-1029.
- Chilvers, J., Foxon, T. J., Galloway, S., Hammond, G. P., Infield, D., Leach, M., Pearson, P. J., Strachan, N., Strbac, G. & Thomson, M. (2017) Realising transition pathways for a more electric, low-carbon energy system in the United Kingdom: Challenges, insights and opportunities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 231, 440-477.
- Daiglou, V., Muratori, M., Lamers, P., Fujimori, S., Kitous, A., Köberle, A. C., Bauer, N., Junginger, M., Kato, E. & Leblanc, F. (2020) Implications of climate change mitigation strategies on international bioenergy trade. *Climatic Change*, 163, 1639-1658.
- Dechamps, P. (2023) The IEA World Energy Outlook 2022—a brief analysis and implications. *European Energy & Climate Journal*, 11, 100-103.
- Díaz, S., Settele, J., Brondizio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. & Chan, K. M. (2019) Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366, eaax3100.
- Dunn, B., Kamath, H. & Tarascon, J.-M. (2011) Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, 334, 928-935.
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C. & Aldridge, D. C. (2015) Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water research*, 75, 63-82.
- Famiglietti, J. S. (2014) The global groundwater crisis. *Nature Climate Change*, 4, 945-948.
- Fan, Y. V., Klemeš, J. J., Perry, S. & Lee, C. T. (2019) Anaerobic digestion of lignocellulosic waste: Environmental impact and economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 231, 352-363.
- Foltz, R. C. (2003) Islamic environmentalism: A matter of interpretation. *Islam and Ecology: A Bestowed Trust*,. Harvard: the President and Fellows of Harvard College.
- Garcia-Teruel, A. & Forehand, D. I. M. (2021) A review of geometry optimisation of wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110593.
- Gattuso, J.-P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R. & Eakin, C. M. (2015) Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349, aac4722.

- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Guillén Bolaños, T., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. A., Diedhiou, A., Djalante, R. & Ebi, K. (2019) The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5 C. *Science*, 365, eaaw6974.
- Ipbes, W. (2019) Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. *Summary for policy makers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. IPBES Secretariat, Bonn, Germany.*
- ‘izz Al-Dīn, M. Y. 2000. *The environmental dimensions of Islam*, James Clarke & Co.
- Ji, G. X., Chan, P. W. K., McCormick, A., Won, M., Ali, S., Jimmy, M., Gulfan, V. G., Faamanatu-Eteuati, N., Suaalii, T. F. & Chesal, K. (2024) Scholarly Responses to ‘UNESCO Global Education Monitoring Report 2024 Pacific Technology in Education: A tool on whose terms?’. *International Education Journal: Comparative Perspectives*, 23, 154-170.
- Ji, W., Guo, N. & Chan, E. H. Comparative review of assessment methodologies of building embodied energy. Creative Construction Conference 2018, 2018.
- Kabeyi, M. J. B. & Olanrewaju, O. A. (2022) Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy research*, 9, 743114.
- Kamada, R. (2024) How Global Warming Causes Extreme Weather Especially Cold Weather.
- Kamali, M. H. (2010) Environmental Care in Islam: A Qur'anic Perspective.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. 2018. *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*, World Bank Publications.
- Kubro, A. D. J. & Ali, M. (2021) The understanding of Islamic Moderation (wasatiyyah al-Islam) and the hadiths on inter-religious relations in the Javanese pesantrens. *Indonesian Journal of Islam and Muslim Societies*, 11, 377-401.
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P. & Barret, K. (2023) IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policymakers. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, h. Lee and j. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P. & Ruane, A. C. (2024) Climate change 2023 synthesis report summary for policymakers. *CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report: Summary for Policymakers.*
- Leicht, A. & Heiss, J. 2018. *Issues and trends in education for sustainable development*, UNESCO publishing.
- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R., Haines, A. & Ramanathan, V. (2019) Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 7192-7197.

- Liu, Z., Deng, Z., Davis, S. J., Giron, C. & Ciais, P. (2022) Monitoring global carbon emissions in 2021. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 217-219.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. & Bezirtzoglou, E. (2020) Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 14.
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. (2010) A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Mostfa, A. (2024) Redefining Qur'ānic Hermeneutics: Muḥammad 'Ābid al-Jābrī and Nasr Hāmid Abū Zayd's Humanistic Interpretations. *Religions*, 15, 278.
- Nasir, M., Khan, H. A., Zaffar, N. A., Vasquez, J. C. & Guerrero, J. M. (2018) Scalable solar dc micrigrids: on the path to revolutionizing the electrification architecture of developing communities. *IEEE Electrification Magazine*, 6, 63-72.
- Pachauri, S., Poblete-Cazenave, M., Aktas, A. & Gidden, M. J. (2021) Access to clean cooking services in energy and emission scenarios after COVID-19. *Nature Energy*, 6, 1067-1076.
- Raimi, D. & Newell, R. G. 2024. Global energy outlook comparison methods: 2023 update.
- Reay, D. S., Davidson, E. A., Smith, K. A., Smith, P., Melillo, J. M., Dentener, F. & Crutzen, P. J. (2012) Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature climate change*, 2, 410-416.
- Riffat, S., Ahmad, M. I. & Shakir, A. 2025a. Eco-Cities: Sustainable Urban Living. *Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Riffat, S., Ahmad, M. I. & Shakir, A. 2025b. Energy-Efficient Lighting Technologies for Building Applications. *Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Riffat, S., Ahmad, M. I. & Shakir, A. 2025c. Introduction: Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings Towards Sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Riffat, S., Ahmad, M. I. & Shakir, A. 2025d. Sustainable Power Generation and Application in Energy-Efficient Buildings. *Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Saniotis, A. (2012) Muslims and ecology: fostering Islamic environmental ethics. *Contemporary Islam*, 6, 155-171.
- Saunois, M., Stavert, A., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J., Jackson, R., Raymond, P., Dlugokencky, E., Houweling, S. & Patra, P. (2020) The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data* 12: 1561–1623. *Go to original source*.
- Senusi, W., Ahmad, M. I., Binhweel, F., Shalfoh, E., Alsaedi, S. & Shakir, M. A. (2024) Biodiesel production and characteristics from waste frying oils: sources, challenges, and circular economic perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.
- Shakir, M. A. & Ahmad, M. I. (2024a) Bioproduct advances: insight into failure factors in mycelium composite fabrication. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, n/a.

- Shakir, M. A. & Ahmad, M. I. (2025a) Biodiesel production from *Ulva lactuca* oil extracted by supercritical carbon dioxide using a biogenic activated carbon catalyst. *Bioresource Technology Reports*, 102393.
- Shakir, M. A., Ahmad, M. I. & Abdul Khalil, H. 2024b. Utilization of marine green algae for the development of bioplastics. *Multidisciplinary Applications of Marine Resources: A Step towards Green and Sustainable Future*. Springer.
- Shakir, M. A., Ahmad, M. I. & Mansur, F. Z. (2025b) Assessment on Sources of PM & TVOCs in School Buildings and Effects on Health of Student: A Systematic Review. *Journal of Climate Change*, 11, 22-22.
- Shakir, M. A., Ahmad, M. I., Mansur, F. Z. & Abdul Khalil, H. P. S. (2024c) Biomass to biofuel: Palm kernel shells as catalyst supports for enhanced biodiesel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18, 2038-2052.
- Shakir, M. A., Ahmad, M. I., Mansur, F. Z., Ramli, N. K. & Zaki, S. A. (2024d) Processing of Waste Biomass: Production of Composite Thermal Insulation Panels from Empty Fruit Bunch and Spent Mushroom Substrates. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 4501-4518.
- Shakir, M. A., Appana, A. R., Khalid, W., Rajamanickam Pjk, S. & Ahmad, M. I. (2025c) Advancing insights into building electrical energy consumption: a comprehensive review of conventional and artificial intelligence methods. *Advances in Building Energy Research*, 19, 533-576.
- Shakir, M. A., Ramli, N. K., Ahmad, M. I., Yusup, Y., Zaki, S. A. & Abdul Khalil, H. (2025d) Development of natural waste fiber desiccant paper coated with biopolymeric material for energy efficient dehumidification. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27, 157-169.
- Shalfogh, E., Ahmad, M. I., Binhweel, F., Shaah, M. A., Senusi, W., Alsaadi, S. & Shakir, M. A. (2025) Biomass to biofuel: Optimizing sustainable biodiesel production from fish waste and thermodynamic-kinetic analysis. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 19, 654-677.
- Shangguan, Z., Li, H., Yang, B., Zhao, Z., Wang, T., Jin, L. & Zhang, C. (2024) Optimization of alkaline electrolyzer operation in renewable energy power systems: A universal modeling approach for enhanced hydrogen production efficiency and cost-effectiveness. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 943-954.
- Silva, V., Mol, H. G., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J. & Geissen, V. (2019) Pesticide residues in European agricultural soils—A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*, 653, 1532-1545.
- Sobirin, M. & Khasanah, K. (2023) The pesantren scholars' Fatwa on global warming and climate change: An integrative analysis of Islamic law, theology, and environmental sciences on the practice of multidisciplinary Ijtihad. *Cogent Arts & Humanities*, 10, 2193023.
- Spencer, T., Colombier, M., Sartor, O., Garg, A., Tiwari, V., Burton, J., Caetano, T., Green, F., Teng, F. & Wiseman, J. (2018) The 1.5 C target and coal sector transition: at the limits of societal feasibility. *Climate Policy*, 18, 335-351.
- Stanisavljević, N., Ubavin, D., Batinić, B., Fellner, J. & Vujić, G. (2012) Methane emissions from landfills in Serbia and potential mitigation strategies: a case study. *Waste Management & Research*, 30, 1095-1103.

- Thomson, P., Bradley, D., Katilu, A., Katuva, J., Lanzoni, M., Koehler, J. & Hope, R. (2019) Rainfall and groundwater use in rural Kenya. *Science of The Total Environment*, 649, 722-730.
- Wang, Z., Hu, Y., Wang, S., Wu, G. & Zhan, X. (2023) A critical review on dry anaerobic digestion of organic waste: Characteristics, operational conditions, and improvement strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176, 113208.
- Wiek, A., Withycombe, L. & Redman, C. L. (2011) Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development. *Sustainability science*, 6, 203-218.
- Worku, M. Y. (2022) Recent advances in energy storage systems for renewable source grid integration: a comprehensive review. *Sustainability*, 14, 5985.
- Yasmeen, K., Yasmin, K. & Al Abri, S. (2024) Islamic framework for sustainable development: Islamic framework for sustainable development. *International Journal of Islamic Finance and Sustainable Development*, 16, 136–160-136–160.
- Zaman, K., Malik, M., Awan, U., Handayani, W., Jabor, M. K. & Asif, M. (2022) Environmental effects of bio-waste recycling on industrial circular economy and eco-sustainability. *Recycling*, 7, 60.
- Zapata, V., Dagnachew, A. G., Edelenbosch, O. Y. & Van Vuuren, D. P. (2025) High-resolution global pathways to achieve 100% electricity access in 2030. *Scientific Reports*, 15, 40096.
- Zheng, X., Wang, C., Cai, W., Kummu, M. & Varis, O. (2016) The vulnerability of thermoelectric power generation to water scarcity in China: Current status and future scenarios for power planning and climate change. *Applied Energy*, 171, 444-455.
- Zuhdi, A., Bilhaq, M. & Putri, L. (2024) Islamic Philosophy's Approach to Environmental Ethics: An Analysis of the Teachings of the Qur'an and Hadith. *Journal of Noesantara Islamic Studies*, 1, 198-213.