

PEMBELAJARAN INOVATIF SEBAGAI PEMANGKIN PEMBANGUNAN BAHAN API BIO LESTARI DAN KESEJAHTERAAN SOSIOEKONOMI

INNOVATIVE LEARNING AS A DRIVER OF SUSTAINABLE BIOFUEL ADVANCEMENT AND SOCIOECONOMIC PROGRESS

Mohammad Aliff Shakir & Mardiana Idayu Ahmad*

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

Fatin Zafirah Mansur

Fakulti Teknologi Kejuruteraan Awam, Universiti Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah, 26300 Kuantan, Pahang, Malaysia

M.I. Rohayati

Fakulti Pendidikan, Universiti Islam Melaka, Batu 28, Kuala Sungai Baru, 78200 Melaka, Malaysia

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

Article History:

Received : 15 November 2025

Revised : 20 November 2025

Published : 31 Disember 2025

© Penerbit Universiti Islam Melaka

To cite this article:

Shakir, M.A., Mansur, F.Z., Ahmad, M.I. & Rohayati, M. I. (2025). PEMBELAJARAN INOVATIF SEBAGAI PEMANGKIN PEMBANGUNAN BAHAN API BIO LESTARI DAN KESEJAHTERAAN SOSIOEKONOMI. Jurnal Ilmi, 15(1), 1-16.

ABSTRAK

Pembangunan bahan api bio yang lestari semakin penting dalam usaha global memperkukuh keselamatan tenaga serta mengurangkan kesan alam sekitar. Namun kemajuannya bergantung kuat kepada kecekapan pendidikan dan keberkesanan rangsangan pembelajaran. Kajian ini menilai peranan pendidikan sebagai pemangkin inovasi dalam sektor bahan api bio, dengan memberi tumpuan kepada bagaimana pembelajaran rentas disiplin, latihan profesional berterusan dan penglibatan masyarakat memperkukuh keupayaan teknikal serta memperluas penerimaan teknologi bahan api bio. Analisis merangkumi perbincangan mengenai jurang pendidikan sedia ada, strategi pembelajaran yang menyokong pembangunan bahan api bio generasi baharu serta implikasi sosioekonomi yang terhasil melalui pewujudan pekerjaan, peningkatan kemahiran dan pembangunan luar bandar. Dapatan kajian menunjukkan bahawa pendidikan yang terancang dan berasaskan pengetahuan bukan sahaja mempercepat inovasi teknologi bahan api bio, malah meningkatkan daya saing industri serta menyumbang kepada matlamat kelestarian global. Rangsangan pembelajaran dikenal pasti sebagai komponen kritikal yang menghubungkan kemajuan teknologi dengan kesejahteraan sosioekonomi, sekali gus mengukuhkan peranan bahan api bio dalam sistem tenaga masa depan.

Kata Kunci: *Bahan api bio lestari, pembelajaran inovatif, pembangunan sosioekonomi, kelestarian tenaga*

ABSTRACT

The development of sustainable biofuels has become increasingly important in global efforts to enhance energy security and mitigate environmental impacts. However, progress in this sector is strongly influenced by the effectiveness of educational systems and the quality of learning stimulation. This study examines the role of education as a catalyst for innovation in the biofuel sector, with particular emphasis on how interdisciplinary learning, continuous professional training, and public engagement strengthen technical capacity and promote wider adoption of biofuel technologies. The analysis addresses existing educational gaps, learning strategies supporting the advancement of next-generation biofuels, and the associated socioeconomic implications, including job creation, skills development, and rural development. The findings suggest that well-structured, knowledge-driven educational initiatives not only accelerate technological innovation in biofuels but also enhance industrial competitiveness while contributing to global sustainability goals. Learning stimulation is identified as a critical mechanism linking sustainable biofuel advancement with socioeconomic progress, thereby reinforcing the role of biofuels in future energy systems.

Keywords: *Sustainable biofuels, innovative learning, socioeconomic development, energy sustainability*

1.0 PENGENALAN

Penggunaan bahan api bio semakin diiktiraf sebagai komponen penting dalam transformasi tenaga global, terutamanya dalam usaha mengurangkan pergantungan terhadap bahan api fosil dan meningkatkan keselamatan tenaga. Sumber tenaga ini yang berasal daripada biomas boleh diperbaharui seperti sisa agroindustri, bahan organik terbiodegradasi dan hasil sampingan perhutanan, yang secara semula jadi mampu diperbaharui melalui kitaran biologi yang berterusan (Kowalski et al., 2022, Binhweel et al., 2025a). Dalam persekitaran yang semakin menekankan peralihan kepada ekonomi rendah karbon, bahan api bio berpotensi menyokong pengurangan pelepasan gas rumah kaca serta mengukuhkan keanjalan sistem tenaga terhadap perubahan iklim (Riffat et al., 2025b). Namun, perkembangan awal bahan api bio generasi pertama telah menimbulkan kritikan kerana pergantungannya kepada tanaman makanan, sekali gus mencetuskan isu persaingan penggunaan tanah dan kebimbangan terhadap keselamatan makanan global (Shakir et al., 2025). Perbincangan ini akhirnya mempercepatkan usaha ke arah penyelidikan dan pembangunan bahan api bio generasi kedua dan ketiga. Generasi ini mengutamakan penggunaan biomas bukan makanan seperti sisa pertanian, lignoselulosa dan mikroorganisma seperti alga, sekali gus menawarkan pilihan yang lebih selaras dengan prinsip kelestarian (Jabłońska-Trypuć et al., 2023). Selain itu, bahan api bio generasi keempat turut diperkenalkan sebagai pendekatan lanjutan yang mengintegrasikan bioteknologi, kejuruteraan genetik dan teknologi penangkapan serta penggunaan karbon (Abdullah et al., 2019). Generasi ini bertujuan menghasilkan bahan api bio dengan kecekapan yang lebih tinggi dan berpotensi mencapai pelepasan karbon sifar atau negatif, berbeza daripada generasi terdahulu yang lebih menumpukan kepada sumber bahan mentah dan proses penukaran. Seiring peralihan ini, integrasi pendidikan dan rangsangan pembelajaran menjadi semakin penting bagi memastikan masyarakat serta tenaga kerja mempunyai kefahaman dan kemahiran yang diperlukan untuk menyokong evolusi teknologi bahan api bio secara berkesan.

Perkembangan generasi baharu bahan api bio turut membuka ruang kepada pembentukan sistem tenaga yang lebih inklusif dan bertanggungjawab. Penggunaan sumber bukan makanan seperti bahan lignoselulosa, rumpai air dan pelbagai sisa biologi bukan sahaja membantu mengurangkan tekanan terhadap bekalan makanan dunia, tetapi juga menyumbang kepada pengurangan jejak karbon sepanjang rantai bekalan tenaga (Dhiman et al., 2022, Alsaadi et al., 2025b). Pada masa yang sama, penghasilan bahan api bio daripada sumber biomas alternatif ini mampu merangsang ekonomi setempat melalui penciptaan peluang pekerjaan baharu, peningkatan aktiviti rantai nilai serta kewujudan perusahaan komuniti berasaskan biomas (Gajula et al., 2021). Manfaat sosioekonomi ini sejajar dengan

dapatan penyelidikan yang menekankan peranan sektor bioekonomi dalam memacu pertumbuhan luar bandar, memperkukuh pendapatan isi rumah dan meningkatkan kemampunan sosial (Subramaniam et al., 2021). Melihat kepada potensi yang melangkaui aspek tenaga semata-mata, pembangunan bahan api bio memerlukan asas pendidikan yang kukuh serta pendekatan pembelajaran yang sistematik bagi memastikan masyarakat, penggubal dasar dan industri dapat memahami serta memanfaatkan teknologi ini secara optimum.

Pembangunan bahan api bio hanya dapat mencapai tahap kelestarian sebenar sekiranya pengeluarannya dirancang secara berhati-hati, dengan mempertimbangkan risiko seperti kehilangan biodiversiti, tekanan terhadap sumber air serta gangguan ekosistem setempat. Justeru, perancangan tenaga masa hadapan memerlukan pendekatan holistik yang menilai hubungan antara dimensi ekologi, ekonomi dan sosial supaya pembangunan bahan api bio tidak menimbulkan kesan sampingan jangka panjang. Dalam konteks ini, dasar yang kukuh serta strategi perancangan yang teliti amat diperlukan untuk menyelaraskan potensi bahan api bio dengan keperluan perlindungan alam sekitar. Keperluan ini menjadi semakin penting apabila sektor tenaga global semakin menumpukan kepada penyelesaian rendah karbon (Usmani et al., 2023). Di samping aspek teknikal dan dasar, kemajuan bahan api bio turut bergantung pada asas pendidikan yang mampan. Kefahaman saintifik mengenai biomas, teknologi penukaran tenaga dan implikasi ekologi merupakan tunjang kepada pembangunan inovasi baharu serta penerimaan masyarakat terhadap bahan api bio (Anderson et al., 2022, Alsaadi et al., 2025a). Pendidikan pada peringkat sekolah perlu diperkukuh melalui integrasi konsep tenaga boleh diperbaharui, biomas dan kelestarian dalam kurikulum untuk membina literasi tenaga sejak awal (Ewim et al., 2023, Riffat et al., 2025a). Kaedah pembelajaran berasaskan projek, eksperimen mudah serta aktiviti komuniti berpotensi merangsang minat pelajar terhadap isu tenaga dan memperkukuh kemahiran saintifik mereka. Pendekatan ini membentuk generasi yang bukan sahaja memahami kepentingan tenaga lestari tetapi juga bersedia menjadi penyumbang utama dalam pembangunan teknologi bahan api bio.

Pendidikan tinggi dan latihan vokasional pula memainkan peranan penting dalam melahirkan tenaga kerja mahir yang dapat menyokong pembangunan sektor bahan api bio. Universiti menjadi pusat penyelidikan dan inovasi, manakala latihan profesional seperti bengkel, modul industri dan pembelajaran dalam talian membantu memastikan kemahiran teknikal sentiasa seiring dengan perkembangan terkini dalam sektor ini (Leibensperger et al., 2021). Pada masa sama, jurang literasi tenaga dalam masyarakat secara keseluruhan masih ketara, menyebabkan penerimaan awam terhadap bahan api bio kurang memberangsangkan. Program kesedaran komuniti dan inisiatif pendidikan awam dapat meningkatkan kefahaman mengenai manfaat bahan api bio, sekali gus menyokong peralihan ke arah amalan tenaga lestari (Ashokri et al., 2023). Melalui usaha pendidikan yang menyeluruh dari peringkat asas hingga profesional, pembangunan teknologi bahan api bio dapat diperkukuh secara inklusif, sambil memperkukuh kesejahteraan sosial dan membina ekosistem tenaga yang lebih berdaya tahan.

2.0 TINJAUAN SEMASA MENGENAI PERANAN BAHAN API BIO

Dalam landskap tenaga global masa kini, bahan api bio semakin menonjol sebagai komponen strategik dalam usaha mengurangkan pergantungan kepada bahan api fosil dan menangani kesan perubahan iklim. Kemajuan dalam teknologi penukaran biomas serta peningkatan kecekapan proses telah memperkukuh daya saing bahan api bio dalam menyediakan tenaga bersih. Perkembangan ini menyumbang kepada pencapaian SDG 7 dan SDG 13 yang menekankan akses kepada tenaga mampan serta pengurangan pelepasan karbon (Amerit et al., 2023). Selain nilai alam sekitar, sektor bahan api bio turut berkembang sebagai pemangkin ekonomi baharu yang menyokong penciptaan pekerjaan, inovasi teknologi dan pembangunan wilayah luar bandar. Pengembangan rantai nilai biomas daripada pengumpulan bahan mentah hingga pemprosesan dan penggunaan akhir mewujudkan peluang ekonomi yang luas, terutama dalam komuniti bergantung kepada sumber pertanian dan perhutanan. Dengan peningkatan penggunaan bahan mentah bukan makanan dan penerapan teknologi pemprosesan yang lebih cekap, peranan bahan api bio terus berkembang sebagai elemen utama dalam transformasi tenaga global. Arah tuju ini mencerminkan komitmen antarabangsa untuk mengutamakan sumber tenaga

rendah karbon yang mampu menyokong pembangunan lestari jangka panjang, sambil memperkukuh daya tahan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat.

3.0 SUMBER BIOMAS DALAM PENGHASILAN BAHAN API BIO

Jenis bahan mentah memainkan peranan penting dalam menentukan kelestarian dan prestasi penghasilan bahan api bio. Bahan api bio generasi pertama lazimnya menggunakan tanaman yang kaya minyak seperti biji bunga matahari, ubi kayu dan minyak biji kapas sebagai sumber utama, namun penggunaan tanaman makanan ini menimbulkan kebimbangan berkaitan keselamatan makanan serta persaingan terhadap tanah pertanian (Chauhan et al., 2023). Perkembangan dalam sektor bahan api bio telah mengalihkan tumpuan kepada bahan mentah generasi kedua yang lebih lestari, meliputi pelbagai bentuk biomas bukan makanan seperti sisa makanan, hampas buah-buahan dari industri pemprosesan, dan residu kilang minyak sawit seperti tandan kosong dan POME (Low et al., 2021, Gebre et al., 2023). Sumber-sumber ini bukan sahaja mengurangkan tekanan terhadap bekalan makanan, malah memanfaatkan aliran sisa organik yang sebelum ini tidak digunakan. Dalam kategori ini juga, penghasilan bahan api bio daripada rumput gajah serta biomas berasaskan serat panjang semakin diberi perhatian, memerlukan pemahaman mendalam terhadap transformasi biokimia dan teknologi penukaran yang lebih efisien (Szulczyk et al., 2022). Pendekatan ini menunjukkan peralihan industri bahan api bio ke arah penggunaan sumber yang lebih pelbagai dan mesra alam, serta menyumbang kepada pembangunan rantaian nilai biomas yang lebih mampan. Ringkasan contoh sumber biomas mengikut generasi ditunjukkan dalam Jadual 1.

Jadual 1: Contoh sumber biomas mengikut generasi untuk penghasilan bahan api bio

Jenis Sumber Biomas	Generasi	Penulis dan Tahun
Jagung berkanji tinggi	Generasi Pertama	(Saini et al., 2023)
Tebu & molases tebu	Generasi Pertama	(Batlle et al., 2021)
Minyak kacang soya	Generasi Pertama	(Sonnemberg et al., 2024)
Jerami padi	Generasi Kedua	(Kumar et al., 2023)
Batang jagung	Generasi Kedua	(Zhang et al., 2024)
Lemak lembu terbuang (beef tallow waste)	Generasi Kedua	(Binhweel et al., 2024)
Sisa ikan (fish waste oil)	Generasi Kedua	(Shalfoh et al., 2025)
Minyak goreng terpakai (waste cooking oil)	Generasi Kedua	(Senusi et al., 2024b)
Kulit kopi	Generasi Kedua	(Lee et al., 2021b)
Sisa rumpai laut coklat	Generasi Kedua	(Twigg et al., 2024)
Yeast lipid – <i>Yarrowia lipolytica</i>	Generasi Ketiga	(Lu et al., 2021)
Fungi oleaginous – <i>Mortierella isabellina</i>	Generasi Ketiga	(Sallet et al., 2025)
Bakteria penghasil lipid – <i>Rhodococcus opacus</i>	Generasi Ketiga	(Ajbar et al., 2022)

Perkembangan teknologi bahan api bio generasi ketiga menandakan perubahan penting dalam sektor tenaga boleh diperbaharui, dengan tumpuan kepada organisma akuatik seperti mikroalga dan sianobakteria sebagai sumber biomas yang berkeupayaan tinggi (Moradi et al., 2022). Organisma ini menarik perhatian kerana kadar pertumbuhan yang pantas, kandungan lipid yang tinggi serta keupayaan hidup dalam pelbagai persekitaran, termasuk air terawat, air masin dan air sisa, tanpa bersaing dengan tanah pertanian. Kemajuan penyelidikan dalam bidang ini bergantung kepada penerokaan kaedah kultur berkecekapan tinggi, penggunaan fotobioreaktor moden, serta inovasi dalam teknik pemecahan sel dan pengekstrakan bioaktif (Shakir et al., 2017). Walaupun kemajuannya pesat, jurang pendidikan masih wujud dalam menyediakan tenaga kerja berkemahiran untuk menyokong pembangunan bahan api bio berasaskan alga.

Kemahiran dalam biologi alga, rekabentuk sistem penanaman, biopemprosesan serta penilaian kelestarian merupakan komponen kritikal yang memerlukan integrasi dalam pendidikan dan latihan

teknikal (Sarwer et al., 2022). Oleh itu, model pendidikan rentas disiplin yang menggabungkan bioteknologi, sains marin dan kejuruteraan proses menjadi penting bagi melahirkan penyelidik serta jurutera yang mampu menangani cabaran teknikal dalam industri ini. Inisiatif pembelajaran berterusan melalui latihan profesional dan platform pendidikan fleksibel memastikan generasi baharu saintis dapat menguasai teknologi pengekstrakan dan strategi penanaman berintensiti tinggi. Pendekatan ini turut memperkukuh kefahaman mereka terhadap kaedah pemprosesan hijau yang menyokong pembangunan bahan api bio alga secara mampan. Pendekatan ini menegaskan peranan pendidikan dalam memperkukuh ekosistem inovasi dan menyokong masa depan industri bahan api bio generasi ketiga.

4.0 MODEL PENDIDIKAN BERSEPADU BAGI MENYOKONG INOVASI BAHAN API BIO

Pembangunan teknologi bahan api bio bergantung kepada satu ekosistem pendidikan yang mampu merangsang pembelajaran pada pelbagai peringkat masyarakat. Pendidikan awal membentuk pemahaman asas mengenai tenaga boleh diperbaharui, manakala latihan lanjutan melengkapkan pelajar, penyelidik dan profesional dengan kemahiran teknikal yang diperlukan untuk mengendalikan proses penukaran biomas, reka bentuk reaktor, serta penilaian kelestarian (Dharmapriya et al., 2023). Pendekatan pendidikan ini bukan sahaja memberi tumpuan kepada aspek saintifik tetapi turut menggalakkan pemikiran kritis dan kesedaran ekologi. Pendedahan kepada bahan api bio di peringkat sekolah dan institusi latihan teknikal membantu melahirkan generasi baharu yang bersedia menerajui inovasi tenaga bersih.

Pembangunan latihan profesional yang tersusun merupakan komponen penting dalam memastikan tenaga kerja sektor bahan api bio mampu menyesuaikan diri dengan perubahan teknologi. Keperluan terhadap pengetahuan rentas disiplin melibatkan sains biologi, kejuruteraan proses, bioteknologi dan pengurusan sumber menjadi asas kepada model pendidikan moden yang menekankan pembelajaran berterusan. Bengkel teknikal, modul latihan dalam talian, serta program peningkatan kemahiran dirangka untuk memastikan para pengamal industri dapat mengikuti kemajuan saintifik terkini, termasuk inovasi dalam pemprosesan biomas dan penjanaan tenaga bio (Kumar, 2022). Pendekatan ini mewujudkan tenaga kerja yang berdaya saing dan berkeupayaan tinggi dalam menerapkan teknologi baharu secara praktikal dan ekonomi.

Penglibatan awam pula memainkan peranan strategik dalam membentuk sokongan sosial terhadap teknologi bahan api bio. Melalui program komuniti, penyampaian maklumat dan inisiatif kesedaran, masyarakat dapat memahami nilai alam sekitar dan sosioekonomi yang dibawa oleh penggunaan bahan api bio (Khan et al., 2025). Sokongan masyarakat yang berinformasi bukan sahaja mempengaruhi penerimaan dasar tenaga boleh diperbaharui, tetapi turut memberi kesan positif terhadap pembangunan luar bandar, peluang pekerjaan dan pengurangan kebergantungan bahan api fosil. Secara keseluruhannya, model pendidikan yang bersepadu menggabungkan pembelajaran asas, latihan profesional dan libat urus awam membentuk rangka kerja komprehensif yang menyokong pembangunan teknologi bahan api bio secara mampan dan sejajar dengan matlamat tenaga masa depan.

4.1 Model Pendidikan Holistik Dalam Industri

Model pendidikan yang menjadi asas kepada pembangunan teknologi bahan api bio menekankan keperluan pendekatan holistik yang menggabungkan pembelajaran rentas disiplin, peningkatan kemahiran berterusan dan pemahaman sosial terhadap tenaga boleh diperbaharui. Pendekatan ini mengiktiraf bahawa inovasi dalam bahan api bio memerlukan lebih daripada pengetahuan teknikal. Ia menuntut kefahaman tentang interaksi antara sistem biologi, kejuruteraan proses, pengurusan sumber dan kesan alam sekitar (Nida et al., 2021, Binhweel et al., 2025b). Dengan menghubungkan pelbagai bidang seperti bioteknologi, kejuruteraan kimia dan sains alam sekitar, model ini mewujudkan rangka kerja yang membolehkan pelajar dan profesional menilai isu seperti kecekapan tenaga, kebolehlaksanaan operasi dan implikasi kelestarian secara menyeluruh. Sebagai contoh, lipid daripada mikroalga yang dikultur telah berjaya ditukarkan kepada biodiesel melalui kaedah transesterifikasi kimia, sekali gus menyokong penilaian kecekapan tenaga dan implikasi kelestarian (Mittal et al., 2023).

Pembelajaran berasaskan penyelesaian masalah dan simulasi teknologi turut menjadi elemen penting bagi menyediakan tenaga kerja yang mampu mengendalikan proses bahan api bio skala industri.

Asumsi utama model ini ialah keperluan untuk memastikan pembelajaran berterusan melalui platform latihan profesional, bengkel teknikal dan modul digital yang membolehkan peserta menyesuaikan diri dengan kemajuan baharu dalam teknologi bahan api bio. Pendekatan ini digabungkan dengan strategi libat urus awam yang menekankan penyampaian maklumat yang jelas mengenai manfaat dan risiko bahan api bio. Usaha ini bertujuan meningkatkan penerimaan masyarakat serta membina sokongan terhadap dasar tenaga bersih (Suryani et al., 2024, Senusi et al., 2024a). Melalui gabungan latihan teknikal dan pendidikan masyarakat, model ini mengandaikan bahawa pembangunan bahan api bio bukan sahaja dapat merangsang inovasi industri, tetapi juga memberi impak positif kepada ekonomi tempatan melalui peluang pekerjaan serta penyertaan komuniti dalam rantai nilai bahan api bio. Keseluruhan rangka model ini menyokong aspirasi kelestarian dengan menanam kefahaman bahawa teknologi bahan api bio perlu dibangunkan seiring pertimbangan alam sekitar dan keperluan tenaga masa depan.

5.0 KEMAJUAN TERKINI DAN CABARAN PENERAPAN TEKNOLOGI BAHAN API BIO

Perkembangan bahan api bio generasi baharu menunjukkan potensi besar dalam mengurangkan jejak karbon sektor tenaga, namun pelaksanaannya masih dibayangi pelbagai kekangan teknikal dan ekonomi. Bagi bahan api bio generasi kedua, cabaran utama terletak pada penukaran biomas bukan makanan kepada bahan api yang stabil dan berkualiti. Sumber seperti sisa tanaman, residu industri pertanian dan bahan berserat memerlukan proses pemecahan struktur yang kompleks sebelum boleh diproses kepada bahan api (Shakir et al., 2023, Ahmad et al., 2024). Laluan biopemprosesan yang melibatkan pra-rawatan bahan mentah, tindak balas enzimatik dan penukaran biokimia sering memerlukan tenaga yang tinggi serta kawalan proses yang ketat, justeru meningkatkan kos operasi (Bhushan et al., 2023). Kebergantungan terhadap enzim khusus dan reaktor berteknologi tinggi turut mengekang kebolehskalaan proses ini ke peringkat komersial.

Bahan api bio generasi ketiga, khususnya berasaskan mikroorganisma akuatik, memperlihatkan kelebihan dari segi produktiviti dan keanjalan penggunaan tanah, namun masih memerlukan penyelesaian teknologi yang lebih maju. Walaupun organisma seperti mikroalga boleh ditanam dalam air sisa atau sistem tertutup yang tidak bersaing dengan sektor pertanian, tahap kecekapan pertumbuhannya bergantung kepada kawalan nutrien, pencahayaan, dan kestabilan kultur. Proses penuaian dan pemisahan biomas pula kekal sebagai antara langkah paling intensif dari segi tenaga, selain memerlukan teknologi pemprosesan yang mampu mengurangkan kehilangan hasil dan kos pengeluaran (Lee et al., 2021a). Kesukaran untuk meningkatkan pengeluaran pada skala industri dan mengekalkan konsistensi operasi turut menjadikan bahan api bio alga kurang kompetitif berbanding bahan api fosil.

Dalam menghadapi halangan ini, rangsangan pembelajaran muncul sebagai komponen strategik untuk memperkukuh keupayaan industri bahan api bio (Kotsis, 2024). Pendidikan teknikal yang ditambah baik, termasuk penguasaan teknologi pemprosesan hijau, pembangunan biokatalis baharu dan pendekatan peningkatan skala yang lebih efisien, membantu penyelidik serta pengamal industri menyesuaikan diri dengan kemajuan sains terkini (Shakir et al., 2024). Latihan rentas disiplin dan program pembelajaran berterusan membolehkan tenaga kerja memahami interaksi antara biologi, kejuruteraan dan ekonomi dalam pengeluaran bahan api bio moden. Pendekatan pendidikan ini bukan sahaja meningkatkan kecekapan teknologi, tetapi juga mengurangkan kos dan memperkukuh daya saing jangka panjang bahan api bio sebagai sumber tenaga mampan.

5.1 Cabaran Kelestarian dan Ekonomi

Kelestarian alam sekitar kekal sebagai asas penilaian dalam pembangunan bahan api bio, namun impaknya bergantung kepada pengurusan sumber yang cekap dan pemahaman penuh terhadap jejak ekologi sepanjang rantai pengeluaran. Walaupun bahan api bio mampu menyumbang kepada pengurangan pelepasan karbon, isu seperti perubahan struktur tanah, penggunaan air yang tinggi, dan

ketidakseimbangan nutrisi dalam ekosistem perlu diberi perhatian (Khan et al., 2023). Penanaman tanaman tenaga juga boleh memberi tekanan kepada landskap sekiranya tidak dirancang secara mampan, termasuk risiko gangguan habitat dan kehilangan spesies tempatan. Di samping itu, keperluan tenaga untuk proses pengeringan, pengekstrakan dan penukaran biomas perlu ditangani bagi memastikan pulangan tenaga bersih benar-benar menguntungkan (Motevali et al., 2023). Dari sudut ekonomi, sektor bahan api bio berdepan cabaran seperti kos pembinaan loji berteknologi tinggi, keperluan rangkaian logistik baharu dan integrasi teknikal ke dalam sistem tenaga sedia ada (Nunes, 2024). Halangan ini menuntut sokongan dasar yang efektif, termasuk standard peraturan yang konsisten serta insentif untuk mempercepat adaptasi teknologi hijau. Pada masa yang sama, rangka kerja dasar perlu berkembang seiring dengan kemajuan teknologi melalui penyediaan insentif penyelidikan, penetapan piawaian peraturan dan galakan amalan pengeluaran yang mesra alam (Ebadian et al., 2020).

Dalam menghadapi kekangan alam sekitar dan ekonomi ini, rangsangan pembelajaran memainkan peranan strategik dalam memperkukuh keupayaan tenaga kerja serta meningkatkan kecekapan operasi industri bahan api bio. Pendidikan teknikal yang menekankan optimasi sumber air, pengurusan tanah secara regeneratif, serta penggunaan teknologi pemprosesan berkecekapan tinggi dapat mengurangkan impak ekologi sekaligus meningkatkan daya saing pengeluaran. Selain itu, latihan profesional yang menumpukan analisis kos-tenaga, pemodelan sistem tenaga, serta integrasi bahan api bio dalam rangkaian pengangkutan membantu penyelidik dan pengamal industri memahami cabaran sebenar dalam peralihan tenaga. Pembelajaran berterusan yang melibatkan penyelidikan, inovasi dan libat urus masyarakat memastikan sektor bahan api bio mampu beradaptasi dengan perkembangan teknologi dan keperluan pasaran. Pendekatan ini seterusnya mewujudkan industri yang lebih berdaya tahan serta bertanggungjawab dari aspek alam sekitar dan ekonomi.

6.0 RANGSANGAN PEMBELAJARAN SEBAGAI TERAS PEMBANGUNAN BAHAN API BIO LESTARI

Kemajuan teknologi bahan api bio yang semakin pesat menuntut satu sistem pembelajaran yang lebih tangkas dan berupaya bergerak seiring dengan perubahan industri. Keperluan ini timbul kerana pembangunan bahan api bio kini melibatkan integrasi pelbagai disiplin seperti bioteknologi, analisis sistem tenaga dan kejuruteraan proses. Selain itu, penglibatan aspek dasar awam dan ekonomi sumber menuntut tenaga kerja yang berpengetahuan luas serta mampu menyesuaikan diri dengan inovasi terkini (Voca et al., 2020, Pascoli et al., 2022). Dalam konteks ini, rangsangan pembelajaran berfungsi sebagai asas penting untuk merapatkan jurang antara keperluan industri dan struktur pendidikan sedia ada, melalui latihan teknikal, program peningkatan kemahiran, serta literasi saintifik yang ditingkatkan dalam kalangan masyarakat. Pendekatan ini menyokong pembentukan ekosistem pengetahuan yang merangkumi penyelidik, jurutera, pembuat dasar dan pengguna. Ekosistem ini memastikan bahawa teknologi bahan api bio bukan sahaja dapat diterima, malah dapat dilaksanakan secara bertanggungjawab dan mampan dalam sistem tenaga masa hadapan.

6.1 Pendidikan, Inovasi dan Jurang Pengetahuan dalam Pembangunan Bahan Api Bio

Jurang pendidikan dalam teknologi bahan api bio masih ketara walaupun industri ini berkembang pesat dengan kemunculan pendekatan pemprosesan yang semakin kompleks. Banyak institusi pengajian belum menyediakan kurikulum yang benar-benar mencerminkan keperluan industri, khususnya dalam bidang seperti bahan api bio berasaskan mikroorganisma, pengurusan biopemprosesan atau teknologi penukaran karbon yang lebih moden (Randell et al., 2025). Kekurangan pendedahan kepada kemahiran teknikal baharu ini turut menjejaskan pembangunan tenaga kerja yang mampu mengendalikan platform teknologi bahan api bio secara berkesan. Selain aspek akademik, pendidikan profesional dalam sektor tenaga juga perlu bergerak lebih pantas agar pekerja industri dapat mengikuti inovasi yang sedang diterapkan dalam sistem pengeluaran dan pemodelan tenaga. Bagi masyarakat umum pula, tahap literasi bahan api bio yang rendah terus menghalang penerimaan pengguna, sekali gus memperlambatkan adaptasi bahan api bio dalam pasaran tenaga.

Jurang pengetahuan turut wujud dalam kalangan pembuat dasar, yang memainkan peranan penting dalam membentuk arah tuju teknologi bahan api bio melalui peraturan, galakan dan mekanisme pasaran. Tanpa pemahaman yang mencukupi terhadap proses bioteknologi, analisis kos-faedah atau implikasi kelestarian, dasar yang diperkenalkan berisiko tidak seiring dengan keperluan industri dan perkembangan saintifik. Dalam konteks ini, hubungan antara pendidikan dan inovasi menjadi kritikal kerana pembelajaran rentas disiplin membolehkan integrasi pengetahuan sains, kejuruteraan dan ekonomi dalam menghasilkan penyelesaian yang lebih relevan. Pendidikan juga bertindak sebagai jambatan yang menghubungkan penyelidikan akademik dengan aplikasi industri melalui kolaborasi penyelidikan, pembangunan peralatan perintis dan aktiviti pemindahan teknologi.

Institusi pendidikan tinggi terus menjadi pemacu utama inovasi bahan api bio dengan menyediakan ruang untuk eksperimen saintifik, pembangunan teknologi dan penghasilan pengetahuan baharu yang memacu transformasi sektor tenaga (Amalia et al., 2025). Kurikulum rentas disiplin yang merangkumi elemen sains alam sekitar, biopemprosesan, kejuruteraan kimia dan penilaian impak sosioekonomi membantu melahirkan generasi penyelidik dan jurutera yang holistik (Afeyan et al., 2020). Dalam masa yang sama, inovasi bahan api bio memerlukan pemahaman melangkaui aspek teknikal, termasuk kesan sosial, daya maju ekonomi dan pertimbangan ekologi yang lebih luas. Pendidikan yang bersifat menyeluruh memastikan bahawa inovasi tidak hanya menumpukan kepada peningkatan output teknologi tetapi turut memberi nilai kepada masyarakat dan menyokong peralihan global menuju sistem tenaga yang lebih lestari.

Pembelajaran berterusan menjadi komponen teras dalam memperkukuh keupayaan tenaga kerja industri bahan api bio, terutamanya apabila teknologi dan kaedah pemprosesan baharu muncul dengan begitu pantas. Bagi memastikan profesional dalam bidang ini kekal relevan, akses kepada latihan modular, program peningkatan kemahiran digital dan bengkel teknikal yang berfokus kepada amalan industri sebenar amat diperlukan (Rodrigues, 2021). Inisiatif pembangunan profesional ini bukan sahaja memperkaya pengetahuan teknikal, tetapi juga menggalakkan pemikiran strategik dalam menilai keberkesanan proses, pengurusan sumber dan penambahbaikan operasi. Dengan adanya ekosistem pembelajaran yang aktif, inovasi dapat diterjemahkan dengan lebih cepat ke dalam aplikasi praktikal, manakala keputusan teknologi dapat dibuat berdasarkan kefahaman yang lebih menyeluruh tentang kelestarian, impak sosioekonomi dan daya saing jangka panjang. Pendekatan ini memastikan bahawa perkembangan bahan api bio masa depan sejajar dengan keperluan industri, sasaran alam sekitar serta keupayaan tenaga kerja untuk menyokong transformasi tenaga secara berterusan.

7.0 PENDEKATAN PENDIDIKAN STRATEGIK UNTUK MEMPERKUKUH INDUSTRI BAHAN API BIO

Kemajuan teknologi bahan api bio bergantung pada strategi pendidikan yang mampu menyesuaikan diri dengan perubahan saintifik dan keperluan industri yang semakin kompleks. Pendekatan pendidikan yang tersusun merangkumi pembangunan kurikulum berasaskan penyelidikan, latihan teknikal yang relevan serta peluang pembelajaran berpusatkan industri amat penting untuk melahirkan tenaga kerja yang kompeten dan berdaya saing. Melalui kerangka pembelajaran yang progresif, institusi pendidikan dapat membina asas pengetahuan yang kukuh, memperkasa kemahiran analitikal, dan memupuk keupayaan inovatif yang diperlukan untuk mengendalikan cabaran serta meneroka potensi baharu dalam teknologi bahan api bio.

7.1 Rangka Pendidikan Bersepadu Memperkukuh Industri Bahan Api Bio

Reka bentuk kurikulum bagi bidang bahan api bio perlu bergerak seiring dengan kemajuan saintifik dan teknologi agar dapat melahirkan graduan yang berdaya saing serta mampu menyumbang kepada penyelesaian tenaga masa hadapan. Kurikulum yang efektif hendaklah merangkumi asas biologi, kimia, kejuruteraan dan sains alam sekitar, di samping menyediakan modul khusus berkaitan sistem pengeluaran bahan api bio, pengurusan bahan mentah, pemodelan proses dan penilaian kelestarian (Farmer et al., 2025). Penerapan pembelajaran berasaskan pengalaman seperti kerja makmal lanjutan, projek reka bentuk proses dan latihan industri akan menjadi komponen penting untuk membina kemahiran praktikal yang tidak dapat diperoleh melalui kuliah teori semata-mata. Bagi tenaga kerja

sedia ada dalam sektor tenaga, program peningkatan kemahiran berfokus kepada inovasi terkini, metodologi pemprosesan hijau dan teknik penilaian impak alam sekitar menjadi asas penting dalam mengekalkan kecekapan profesional (Srivastava, 2024).

Selain penambahbaikan kurikulum, beberapa negara telah menunjukkan kejayaan melalui pelaksanaan program pendidikan kontekstual dan kerjasama strategik bagi menyokong pembangunan teknologi bahan api bio. Di China, penggunaan pendekatan “pembelajaran melalui pelaksanaan” yang terbukti mampu menurunkan kos pengeluaran bahan api bio maju secara signifikan melalui peningkatan kecekapan teknologi dan pengumpulan pengalaman industri (Yang et al., 2021, Li et al., 2023). Dalam sektor teknikal pula, beberapa institusi latihan vokasional telah membangunkan modul khusus untuk melatih juruteknik bagi operasi fasiliti bahan api bio moden, termasuk kemahiran penyelenggaraan proses, keselamatan loji dan automasi asas. Pendekatan latihan bersasaran ini membantu memastikan bahawa tenaga kerja peringkat teknikal mempunyai keupayaan sebenar untuk menyokong operasi bahan api bio pada skala komersial.

Di peringkat komuniti, program pendidikan berteraskan masyarakat turut memainkan peranan penting dalam memperluas pemahaman dan penerimaan bahan api bio. Inisiatif pembelajaran komuniti yang melibatkan demonstrasi teknologi, latihan penghasilan bahan api bio skala kecil dan penggunaan sumber biomas tempatan telah meningkatkan literasi tenaga dalam kalangan penduduk luar bandar, selain membuka peluang penajaan tenaga secara berdikari (Ymeri et al., 2020). Kaedah ini memberikan nilai tambah bukan sahaja dari sudut pendidikan, tetapi juga dari segi pembangunan sosial dan ekonomi. Secara keseluruhannya, gabungan kurikulum moden, latihan profesional berstruktur dan program pendidikan masyarakat membentuk rangka pendidikan yang kukuh untuk menyokong kemajuan teknologi bahan api bio, memastikan inovasi dapat dilaksanakan secara praktikal, lestari dan inklusif.

7.2 Integrasi Pendidikan dan Bioteknologi dalam Pembangunan Teknologi Bahan Api Bio

Pengintegrasian rangsangan pembelajaran dalam pendidikan bahan api bio menjadi asas penting untuk membina kefahaman yang mantap tentang teknologi tenaga boleh diperbaharui. Pada peringkat awal pendidikan, pendedahan terhadap konsep asas kelestarian, sumber tenaga alternatif dan peranan biomas membantu membentuk kesedaran generasi muda terhadap isu persekitaran. Pada peringkat universiti pula, pendidikan perlu lebih berfokus kepada pemahaman saintifik dan teknikal melalui kursus yang merangkumi asas bahan api bio, kejuruteraan proses serta pengurusan sumber. Pendekatan ini menuntut gabungan teori, latihan makmal dan aktiviti berasaskan projek bagi melahirkan graduan yang bersedia menghadapi cabaran penyelidikan dan industri. Di samping itu, pembelajaran berterusan yang responsif terhadap perkembangan teknologi memastikan tenaga kerja sedia ada kekal kompetitif dalam sektor bahan api bio yang dinamik.

Bioteknologi memainkan peranan yang semakin kritikal dalam membentuk kandungan dan pendekatan pembelajaran berkaitan bahan api bio. Kemajuan dalam kejuruteraan enzim, mikroorganisma rekayasa dan teknik pra-rawatan biomas membuka laluan kepada proses penukaran yang lebih cekap untuk bahan api bio generasi kedua (Pfleger et al., 2023). Dalam konteks bahan api bio generasi ketiga pula, bioteknologi membolehkan pengoptimuman pertumbuhan alga melalui pengubahsuaian genetik, kawalan persekitaran dan strategi pemprosesan yang dipertingkatkan (Rafa et al., 2021, Powar et al., 2022). Untuk menyokong keperluan ini, pendidikan bahan api bio perlu menggabungkan elemen biologi molekul, mikrobiologi, biokimia, reka bentuk bioreaktor dan inovasi proses agar pelajar memahami hubungan antara prinsip bioteknologi dan pengeluaran bahan api bio yang cekap (Alanazi, 2023, Figueiredo et al., 2023). Kerja penyelidikan, praktikum makmal dan latihan aplikasi industri menjadi keperluan utama bagi memupuk kemahiran teknikal tersebut.

Perkembangan pesat dalam penyelidikan bioteknologi turut menuntut kerangka pendidikan yang menyeluruh dan bersifat adaptif. Bengkel profesional, seminar penyelidikan dan platform pembelajaran digital menyediakan medium untuk memperluas kefahaman peserta industri terhadap perkembangan terkini dalam pemprosesan bahan api bio. Selain aspek teknikal, pendidikan juga perlu menekankan pertimbangan etika, implikasi ekologi dan daya saing ekonomi sesuatu teknologi bioteknologi, termasuk keseimbangan impak ekologi dan kebolehskalaan proses. Penggabungan ilmu bioteknologi dalam pendidikan bahan api bio secara holistik bukan sahaja meningkatkan keupayaan

pelajar dan profesional, malah memastikan sektor bahan api bio bergerak ke arah pembangunan teknologi yang lebih cekap, bertanggungjawab dan mampan.

8.0 SUMBANGAN PENDIDIKAN TERHADAP KEMAJUAN SOSIOEKONOMI BAHAN API BIO LESTARI

Pembangunan bahan api bio berasaskan pendidikan kukuh membawa implikasi sosioekonomi yang signifikan, terutama melalui peningkatan kapasiti tenaga kerja, pertumbuhan industri dan pengukuhan ekonomi setempat. Pendekatan rangsangan pembelajaran memastikan penguasaan pengetahuan saintifik dan kemahiran teknikal yang diperlukan untuk mengoptimumkan pengeluaran bahan api bio, seterusnya memperkukuh inovasi serta produktiviti sektor ini. Kesan pembelajaran ini menyokong kemajuan SDG 8 melalui peluasan peluang pekerjaan dan pemerikasaan tenaga kerja dalam industri hijau yang sedang berkembang (Vural Gursel et al., 2021). Pada masa yang sama, penerapan ilmu bahan api bio dalam sistem tenaga menyumbang kepada SDG 7 dengan meningkatkan kebolehpasaran tenaga boleh diperbaharui yang lebih mampan dan berdaya saing (Kang et al., 2023). Dari sudut alam sekitar, pendidikan berperanan memacu amalan pengeluaran yang lebih bertanggungjawab, termasuk pengurangan pelepasan gas rumah kaca serta penggunaan sumber biomas secara lestari, sejajar dengan SDG 13 (García-Franco et al., 2021). Pembangunan bahan api bio yang berasaskan pengetahuan turut merangsang ekonomi luar bandar melalui pewujudan rangkaian bekalan baharu, diversifikasi sumber pendapatan dan peningkatan keterangkuman sosioekonomi. Secara keseluruhannya, pendidikan menjadi pemacu utama yang menyatukan kemajuan teknologi, pembangunan ekonomi dan kelestarian alam sekitar, sekali gus mengukuhkan peranan bahan api bio sebagai komponen penting dalam agenda pembangunan mampan global.

8.1 Ekonomi Bahan Api Bio, Pembangunan Modal Insan dan Keperluan Pendidikan

Pembangunan bahan api bio berasaskan pengetahuan semakin muncul sebagai pemacu penting transformasi ekonomi global, terutamanya di negara yang memiliki sumber biomas yang melimpah. Kemajuan sains dan teknologi telah meningkatkan kecekapan penukaran biomas kepada bahan api, mengurangkan kos operasi dan mengukuhkan daya saing bahan api bio dalam pasaran tenaga moden (Kugele et al., 2023). Peningkatan produktiviti proses ini turut menggalakkan pelaburan sektor swasta, mempelbagaikan sumber pendapatan negara dan menyokong pengurangan pergantungan terhadap bahan api fosil import. Dengan adanya pilihan tenaga domestik yang lebih stabil, negara berupaya memperkukuh keselamatan tenaga dan memperbaiki keseimbangan dagangan, selain menyumbang kepada sasaran global pengurangan pelepasan karbon.

Selain kesan ekonomi makro, industri bahan api bio menjana peluang pekerjaan yang luas merentasi rangkaian nilai daripada pengeluaran bahan mentah hinggalah kepada operasi loji dan penyelidikan lanjutan (Malla et al., 2023). Keperluan kerja dalam sektor ini, termasuk peranan teknikal seperti juruteknik bioprogram, operator bioreaktor atau pakar kawalan proses, membuka laluan peningkatan kerjaya kepada tenaga kerja tempatan. Keperluan industri terhadap kemahiran baharu turut merangsang pembangunan program latihan, seterusnya meningkatkan kebolehpasaran tenaga kerja dan memperkukuh pembangunan sosioekonomi di kawasan luar bandar (Karp et al., 2021). Di samping itu, penyertaan komuniti terpinggir dalam projek bahan api bio berskala kecil seperti penghasilan biogas komuniti atau biodiesel pertanian membantu meningkatkan mobiliti sosial dan menyokong keterangkuman ekonomi (De Paola et al., 2021).

Dalam konteks pendidikan, perkembangan pesat teknologi bahan api bio menuntut keupayaan tenaga kerja untuk memahami hubungan kompleks antara aspek teknikal, alam sekitar dan ekonomi dalam pengeluaran bahan api bio. Salah satu cabaran utama ialah memastikan kurikulum pendidikan mampu mengikuti perubahan teknologi yang pantas dan sejajar dengan keperluan industri sebenar. Cabaran ini diperkuatkan oleh jurang antara kemajuan penyelidikan universiti dan kebolehlaksanaan aplikasi industri, terutama dalam teknologi baharu seperti bahan api bio sintetik dan biokonversi suhu rendah (Yusoff et al., 2021). Oleh itu, pembentukan tenaga kerja yang kompeten memerlukan integrasi pendidikan rentas disiplin, termasuk penilaian kitar hayat, ekonomi tenaga, kejuruteraan proses dan pemahaman risiko sosial.

Walau bagaimanapun, peluang dalam pendidikan bahan api bio sangat besar seiring pertumbuhan global tenaga boleh diperbaharui. Institusi pendidikan mempunyai ruang untuk memperkukuh peranan melalui pembentukan kursus khusus, kerjasama penyelidikan bersama industri serta pelaksanaan latihan industri berstruktur. Platform pembelajaran digital turut memperluas akses kepada kursus bahan api bio, membolehkan pekerja dan pelajar meningkatkan kemahiran secara fleksibel (Guo et al., 2022). Pada masa yang sama, peningkatan literasi tenaga dalam kalangan pembuat dasar amat penting untuk memastikan dasar penyelidikan, insentif fiskal dan peraturan industri sejajar dengan keperluan pembangunan mampan. Secara keseluruhan, gabungan kesan ekonomi, pembangunan modal insan dan pengukuhan pendidikan mencerminkan peranan strategik bahan api bio sebagai komponen utama dalam transformasi tenaga global.

9.0 KESIMPULAN

Pembangunan bahan api bio masa hadapan bergantung pada keupayaan sistem pendidikan untuk merangsang pembelajaran yang dinamik, inklusif dan berorientasikan inovasi merentas semua peringkat daripada pendidikan asas hingga latihan profesional lanjutan. Seajar dengan objektif kajian ini, perbincangan telah memfokuskan kepada peranan pendidikan dan rangsangan pembelajaran dalam menyokong pembangunan bahan api bio merentasi aspek teknologi, kelestarian alam sekitar dan implikasi sosioekonomi. Kajian ini menegaskan bahawa integrasi pendekatan rentas disiplin, penguasaan bioteknologi, dan penglibatan awam merupakan asas penting bagi membina tenaga kerja mahir yang mampu memacu penyelidikan dan memperkukuh daya saing industri bahan api bio. Penekanan terhadap literasi tenaga lestari dan pembangunan kemahiran teknikal bukan sahaja menyokong penerimgunaan teknologi bahan api bio secara meluas, tetapi turut menyumbang kepada pertumbuhan ekonomi, kestabilan sosial dan pengurangan kesan alam sekitar. Sebagai sumbangan utama, kajian ini mengemukakan kerangka konseptual yang menekankan pendidikan sebagai pemangkin strategik dalam menghubungkan inovasi bahan api bio dengan kesejahteraan sosioekonomi. Dengan memanfaatkan pendidikan sebagai pemangkin perubahan, sektor bahan api bio berpotensi menjadi tunjang utama dalam peralihan global ke arah sistem tenaga yang lebih bersih, cekap dan mampan. Usaha ini memastikan bahawa kemajuan teknologi bergerak seiring dengan matlamat pembangunan negara serta keperluan masyarakat.

Penghargaan

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

Sumbangan Pengarang

Shakir, M.A. bertanggungjawab dalam pembangunan idea kajian, penulisan bahagian Pengenalan, serta penyelarasan keseluruhan struktur manuskrip.

Mansur, F.Z. menyumbang kepada penulisan dan pengembangan bahagian Perbincangan, termasuk analisis kandungan serta interpretasi isu utama dalam kajian.

Ahmad, M.I. menjalankan semakan kritikal, penyuntingan akhir, dan penambahbaikan akademik terhadap manuskrip sebelum dihantar kepada penerbit.

Rohayati, M.I. menyumbang dalam semakan kandungan konseptual manuskrip sebelum dihantar kepada penerbit.

Penolakan tuntutan

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

RUJUKAN

- Abdullah, B., Muhammad, S. a. F. a. S., Shokravi, Z., Ismail, S., Kassim, K. A., Mahmood, A. N. & Aziz, M. M. A. (2019) Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 107, 37-50.
- Afeyan, N. B. & Cooney, C. L. (2020) Professor Daniel IC Wang: a legacy of education, innovation, publication, and leadership. *Biotechnology and Bioengineering*, 117, 3615.
- Ahmad, M. I., Alsaadi, S., Shakir, M. A., Binhweel, F., Senusi, W., Shalfoh, E. & Abdul Khalil, H. 2024. Fueling the Future: Extraction and Production Technological Development of Marine Macroalgae-Seaweed Biodiesel. *Multidisciplinary Applications of Marine Resources: A Step towards Green and Sustainable Future*. Springer.
- Ajbar, A., Alqahtani, R. T. & Musa, S. S. (2022) Static and dynamic analysis of a continuous bioreactor model for the production of biofuel from refinery wastewater using rhodococcus opacus. *Mathematics*, 10, 2842.
- Alanazi, F. H. (2023) Saudi students' and science teachers' knowledge of and attitudes towards biotechnology. *Journal of Biological Education*, 57, 196-213.
- Alsaadi, S., Ahmad, M. I. & Shakir, M. A. (2025a) Kinetics and thermodynamics study of lipid extraction from Camelus dromedarius fat waste and feedstock application in biodiesel production. *Discover Sustainability*, 6, 1102.
- Alsaadi, S., Shakir, M. A. & Ahmad, M. I. (2025b) A Comparative Review of Vegetative and Animal-Based Biodiesel: Feedstock Selection, Synthesis Method, Characterization Technique, and Economic Perspective. *Journal of Climate Change*, 11, 22-22.
- Amalia, R. & Sipayung, R. (2025) A Project-Based Learning Approach for Chemical Engineering Students Involving Waste Cooking Oil Biodiesel Production for Portable Stove Application. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11, 555-567.
- Amerit, B., Ntayi, J. M., Ngoma, M., Bashir, H., Echegu, S. & Nantongo, M. (2023) Commercialization of biofuel products: A systematic literature review. *Renewable Energy Focus*, 44, 223-236.
- Anderson, B. J., Mueller, D. W., Hoard, S. A., Sanders, C. M. & Rijkhoff, S. A. (2022) Social science applications in sustainable aviation biofuels research: Opportunities, challenges, and advancements. *Frontiers in energy research*, 9, 771849.
- Ashokri, H. a. A. & Abuzririq, M. a. K. The impact of environmental awareness on personal carbon footprint values of biology department students, Faculty of Science, El-Mergib University, Al-Khums, Libya. *Acta biology forum*. V02i02, 2023. 22.
- Batlle, E. a. O., Palacio, J. C. E., Lora, E. E. S., Bortoni, E. D. C., Nogueira, L. a. H., Caballero, G. E. C., Julio, A. a. V. & Escorcia, Y. C. (2021) Energy, economic, and environmental assessment of the integrated production of palm oil biodiesel and sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 311, 127638.
- Bhushan, S., Jayakrishnan, U., Shree, B., Bhatt, P., Eshkabilov, S. & Simsek, H. (2023) Biological pretreatment for algal biomass feedstock for biofuel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 109870.
- Binhweel, F., Ahmad, M. I., Hps, A. K., Hossain, M. S., Shakir, M. A., Senusi, W., Shalfoh, E. & Alsaadi, S. (2024) Kinetics, thermodynamics, and optimization analyses of lipid

- extraction from discarded beef tallow for bioenergy production. *Separation science and technology*, 59, 1601-1620.
- Binhweel, F., Ahmad, M. I., Hps, A. K. & Shakir, M. A. (2025a) Biodiesel Production from *Ulva lactuca*: Insights into Kinetic and Thermodynamic Evaluation of Lipid Transesterification. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 103856.
- Binhweel, F., Ahmad, M. I. & Shakir, M. A. (2025b) Harnessing waste lipids for biodiesel: Optimization and thermodynamic investigation of beef tallow transesterification. *International Journal of Green Energy*, 1-13.
- Chauhan, M., Vanshika, Kumar, A., Chauhan, D. & Jain, A. K. (2023) Renewable feedstocks for biofuels. *Biofuel Extraction Techniques*, 151-176.
- De Paola, M. G., Mazza, I., Paletta, R., Lopresto, C. G. & Calabrò, V. (2021) Small-scale biodiesel production plants—An overview. *Energies*, 14, 1901.
- Dharmapriya, T. N., Huang, P. J., Dissanayaka, D. D. S., Dharmapriya, J. J. & Shein, P. P. (2023) Survey on social awareness towards energy conservation and ESD lesson on biofuel as a renewable energy source. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 13, 658-667.
- Dhiman, S. & Mukherjee, G. (2022) Utilization of food waste for biofuel production: A biorefining perspective. *Materials Today: Proceedings*.
- Ebadian, M., Van Dyk, S., Mcmillan, J. D. & Saddler, J. (2020) Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. *Energy Policy*, 147, 111906.
- Ewim, D. R. E., Abolarin, S. M., Scott, T. O. & Anyanwu, C. S. (2023) A survey on the understanding and viewpoints of renewable energy among South African school students. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9, 15375-01e.
- Farmer, J. L., Chan, A. & Galatro, D. (2025) Building Bridges in Chemical Engineering Education-Curriculum Integration via Biodiesel Production. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEA)*.
- Figueiredo, M., Dias, A., Neves, J. & Vicente, H. (2023) Assessment of Literacy to Biotechnological Solutions for Environmental Sustainability in Portugal. *Sustainability*, 15, 10056.
- Gajula, S. & Reddy, C. (2021) More sustainable biomass production and biorefining to boost the bioeconomy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15, 1221-1232.
- García-Franco, A., Godoy, P., De La Torre, J., Duque, E. & Ramos, J. L. (2021) United Nations sustainability development goals approached from the side of the biological production of fuels. *Microbial Biotechnology*, 14, 1871.
- Gebre, G. D., Gebremariam, S. N., Keneni, Y. G. & Marchetti, J. M. (2023) Valorization of tropical fruit-processing wastes and byproducts for biofuel production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 17, 1807-1842.
- Guo, L., Abdul, N. M. M., Vengalil, M., Wang, K. & Santuzzi, A. (2022) Engaging renewable energy education using a web-based interactive microgrid virtual laboratory. *IEEE Access*, 10, 60972-60984.
- Jabłońska-Trypuć, A., Wolejko, E., Ernazarovna, M. D., Głowacka, A., Sokołowska, G. & Wydro, U. (2023) Using algae for biofuel production: a review. *Energies*, 16, 1758.
- Kang, H., Li, G. & Gao, J. (2023) Development of bio-diesel to achieve Sustainable Development Goal 7. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1057336.
- Karp, S. G., Medina, J. D., Letti, L. A., Woiciechowski, A. L., De Carvalho, J. C., Schmitt, C. C., De Oliveira Penha, R., Kumlehn, G. S. & Soccol, C. R. (2021) Bioeconomy and biofuels: the case of sugarcane ethanol in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15, 899-912.

- Khan, M. S. & Khan, A. A. (2025) The Role of Advanced Biofuels in Promoting Energy Access and Economic Growth in Rural Areas. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 43, 8-21.
- Khan, N. F. & Rehman, I. U. 2023. Impacts of the biofuel industry on the environment. *Environmental Sustainability of Biofuels*. Elsevier.
- Kotsis, K. T. (2024) Promoting Scientific Literacy by Teaching in Primary Education the Issue of " Biomass for Biodiesel". *European Journal of Contemporary Education and E-Learning*, 2, 63-76.
- Kowalski, Z., Kulczycka, J., Verhé, R., Desender, L., De Clercq, G., Makara, A., Generowicz, N. & Harazin, P. (2022) Second-generation biofuel production from the organic fraction of municipal solid waste. *Frontiers in Energy Research*, 10, 919415.
- Kugele, A. S. H. & Sarkar, B. (2023) Reducing carbon emissions of a multi-stage smart production for biofuel towards sustainable development. *Alexandria Engineering Journal*, 70, 93-113.
- Kumar, A. (2022) Designed, Conducted and Implemented Training Module for Key Employees in Biotechnology Industry. *i-Manager's Journal of Educational Technology*, 19, 1.
- Kumar, V., Singh, P., Sharma, J., Saini, S., Sharma, P. & Sharma, A. (2023) Rice straw management through biofuel, biochar, mushroom cultivation, and paper production to overcome environmental pollution in North India. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5, 483-510.
- Lee, S. Y., Khoiroh, I., Vo, D.-V. N., Senthil Kumar, P. & Show, P. L. (2021a) Techniques of lipid extraction from microalgae for biofuel production: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 231-251.
- Lee, X. J., Ong, H. C., Gao, W., Ok, Y. S., Chen, W.-H., Goh, B. H. H. & Chong, C. T. (2021b) Solid biofuel production from spent coffee ground wastes: Process optimisation, characterisation and kinetic studies. *Fuel*, 292, 120309.
- Leibensperger, C., Yang, P., Zhao, Q., Wei, S. & Cai, X. (2021) The synergy between stakeholders for cellulosic biofuel development: perspectives, opportunities, and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110613.
- Li, Y., Wen, Y., Chen, B., Fu, X. & Wu, Y. (2023) The dilemma and potential development of biodiesel in China-In view of production capacity and policy. *Energy for Sustainable Development*, 75, 60-71.
- Low, S. S., Bong, K. X., Mubashir, M., Cheng, C. K., Lam, M. K., Lim, J. W., Ho, Y. C., Lee, K. T., Munawaroh, H. S. H. & Show, P. L. (2021) Microalgae cultivation in palm oil mill effluent (POME) treatment and biofuel production. *Sustainability*, 13, 3247.
- Lu, R., Cao, L., Wang, K., Ledesma-Amaro, R. & Ji, X.-J. (2021) Engineering *Yarrowia lipolytica* to produce advanced biofuels: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 341, 125877.
- Malla, F. A., Bandh, S. A., Wani, S. A., Hoang, A. T. & Sofi, N. A. 2023. Biofuels: potential alternatives to fossil fuels. *Biofuels in circular economy*. Springer.
- Mittal, V. & Ghosh, U. K. (2023) Optimization of biodiesel production from *Spirulina* microalgae via nanocatalytic transesterification process. *Bioresource Technology Reports*, 23, 101504.
- Moradi, P. & Saidi, M. (2022) Biodiesel production from *Chlorella Vulgaris* microalgal-derived oil via electrochemical and thermal processes. *Fuel Processing Technology*, 228, 107158.
- Motevali, A., Hooshmandzadeh, N., Fayyazi, E., Valipour, M. & Yue, J. (2023) Environmental impacts of biodiesel production cycle from farm to manufactory: an application of sustainable systems engineering. *Atmosphere*, 14, 399.

- Nida, S., Marsuki, M. F. & Eilks, I. (2021) Palm-oil-based biodiesel in Indonesia: a case study on a socioscientific issue that engages students to learn chemistry and its impact on society. *Journal of Chemical Education*, 98, 2536-2548.
- Nunes, L. J. (2024) Exploring the present and future of biomass recovery units: technological innovation, policy incentives and economic challenges. *Biofuels*, 15, 375-387.
- Pascoli, D. U., Aui, A., Frank, J., Therasme, O., Dixon, K., Gustafson, R., Kelly, B., Volk, T. A. & Wright, M. M. (2022) The US bioeconomy at the intersection of technology, policy, and education. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, 16, 9-26.
- Pfleger, B. F. & Takors, R. (2023) Recent progress in the synthesis of advanced biofuel and bioproducts. *Current Opinion in Biotechnology*, 80, 102913.
- Powar, R. S., Yadav, A. S., Ramakrishna, C. S., Patel, S., Mohan, M., Sakharwade, S. G., Choubey, M., Ansu, A. K. & Sharma, A. (2022) Algae: A potential feedstock for third generation biofuel. *Materials Today: Proceedings*, 63, A27-A33.
- Rafa, N., Ahmed, S. F., Badruddin, I. A., Mofijur, M. & Kamangar, S. (2021) Strategies to produce cost-effective third-generation biofuel from microalgae. *Frontiers in Energy Research*, 9, 749968.
- Randell, J. M., Boon, L. M., Nguyen, H. H., Perez, J., Windham, C. D. & Cermak, D. M. (2025) Biodiesel Production, Analysis, and Combustion: An Across-the-Curriculum Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 102, 765-775.
- Riffat, S., Ahmad, M. I. & Shakir, A. 2025a. Sustainable Power Generation and Application in Energy-Efficient Buildings. *Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Riffat, S., Ahmad, M. I. & Shakir, A. 2025b. Zero-Energy and Low Carbon Buildings. *Sustainable Energy Technologies and Low Carbon Buildings*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Rodrigues, A. C. C. (2021) Policy, regulation, development and future of biodiesel industry in Brazil. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100197.
- Saini, P., Gupta, C. & Shankar, R. (2023) Characterization of corn oil biodiesel and its application in diesel engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45, 9498-9512.
- Sallet, D., Ugalde, G. A., Tres, M. V., Mazutti, M. A., Zabet, G. L. & Kuhn, R. C. (2025) Oil and Biodiesel Production from *Mortierella isabellina* Biomass by a Direct Near-Critical Fluid Extraction and Transesterification Method. *Biomass*, 5, 6.
- Sarwer, A., Hamed, S. M., Osman, A. I., Jamil, F., Al-Muhtaseb, A. a. H., Alhajeri, N. S. & Rooney, D. W. (2022) Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2797-2851.
- Senusi, W., Ahmad, M. I., Binhweel, F., Shalfah, E., Alsaedi, S. & Shakir, M. A. (2024a) Biodiesel production and characteristics from waste frying oils: sources, challenges, and circular economic perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 33239-33258.
- Senusi, W., Ahmad, M. I., Khalil, H. A., Shakir, M. A., Binhweel, F., Shalfah, E. & Alsaedi, S. (2024b) Comparative assessment for biodiesel production from low-cost feedstocks of third oil generation. *Renewable Energy*, 236, 121369.
- Shakir, M. A. & Ahmad, M. I. (2025) 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., Mansur, F. Z. & Abdul Khalil, H. (2024) 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., Yusup, Y., Wabaidur, S. M., Siddiqui, M. R., Alam, M. & Rafatullah, M. (2023) Effect of fibrillation degree of empty fruit bunch fiber on sandwich composite incorporate with spent mushroom substrate. *Journal of Industrial Textiles*, 53, 15280837231153661.
- Shakir, M. A., Yhaya, M. F. & Ahmad, M. I. (2017) Physical effects of pre-hydrolysis and alkali treatment of empty fruit bunch (EFB) fibers. *Int J Chem Eng Appl*, 8, 387-391.
- Shalfoh, 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.
- Sonnemberg, M. S., Souza, E., Ventura, M., Simionatto, E. & Fiorucci, A. (2024) Investigation of curcumin antioxidant efficiency on oxidation stability of biodiesel from soybean oil and beef tallow, contaminated with metals: Kinetic and storage studies. *Fuel*, 368, 131520.
- Srivastava, P. 2024. Government initiative and policy for agricultural waste utilization as biofuel. *Emerging trends and techniques in biofuel production from agricultural waste*. Springer.
- Subramaniam, Y. & Masron, T. A. (2021) The impact of economic globalization on biofuel in developing countries. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100064.
- Suryani, A. S., Tambunan, T. T., Santosa, B. & Haryanto, J. T. (2024) Circular economy approach to the management of used cooking oil for biofuel production. *Journal of Economics, Management, Entrepreneurship, and Business (JEMEB)*, 4, 98-105.
- Szulczyk, K. R. & Badeeb, R. A. (2022) Nontraditional sources for biodiesel production in Malaysia: The economic evaluation of hemp, jatropha, and kenaf biodiesel. *Renewable Energy*, 192, 759-768.
- Twigg, G., Fedenko, J., Hurst, G., Stanley, M. S. & Hughes, A. D. (2024) A review of the current potential of European brown seaweed for the production of biofuels. *Energy, Sustainability and Society*, 14, 21.
- Usmani, R. A., Mohammad, A. S. & Ansari, S. S. (2023) Comprehensive biofuel policy analysis framework: A novel approach evaluating the policy influences. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 183, 113403.
- Voca, N. & Ribic, B. (2020) Biofuel production and utilization through smart and sustainable biowaste management. *Journal of cleaner production*, 259, 120742.
- Vural Gursel, I., Quist-Wessel, F., Langeveld, H., Kline, K. L., Slingerland, M., Grassini, P., Kwant, K. & Elbersen, W. (2021) Variable demand as a means to more sustainable biofuels and biobased materials. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15, 15-31.
- Yang, J. & Shan, H. (2021) The willingness of submitting waste cooking oil (WCO) to biofuel companies in China: an evolutionary analysis in catering networks. *Journal of Cleaner Production*, 282, 125331.
- Ymeri, P., Gyuricza, C. & Fogarassy, C. (2020) Farmers' attitudes towards the use of biomass as renewable energy—A case study from southeastern europe. *Sustainability*, 12, 4009.
- Yusoff, M. N. a. M., Zulkifli, N. W. M., Sukiman, N. L., Chyuan, O. H., Hassan, M. H., Hasnul, M. H., Zulkifli, M. S. A., Abbas, M. M. & Zakaria, M. Z. (2021) Sustainability of palm biodiesel in transportation: a review on biofuel standard, policy and international collaboration between Malaysia and Colombia. *Bioenergy research*, 14, 43-60.
- Zhang, C., Zhan, Y., Chen, W.-H., Tran, K.-Q. & Zhang, Y. (2024) Comparative advantages of gas-pressurized torrefaction for corn stalk conversion to achieve solid biofuel production. *Fuel*, 376, 132683.