

PENDEKATAN PEMBELAJARAN AMALI MENGGUNAKAN MICROBIAL FUEL CELL (MFC): DAMPAK TERHADAP PEMAHAMAN KELESTARIAN DAN KEMAHIRAN SAINTIFIK MURID TINGKATAN EMPAT

[HANDS-ON LEARNING APPROACH USING MICROBIAL FUEL CELL (MFC): IMPACT ON FORM FOUR STUDENTS' UNDERSTANDING OF SUSTAINABILITY AND SCIENTIFIC SKILLS]

MUAZ MOHD ZAINI MAKHTAR¹ & NOR ASNIZA ISHAK¹

¹ Pusat Pengajian Teknologi Industri, Divisyen Teknologi Bioproses, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia
e-Mail: E-mail: muazzaini@usm.my

² Pusat Pengajian Ilmu Pendidikan, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia
e-Mail: E-mail: asnizaishak@usm.my

Corresponding author: muazzaini@usm.my; asnizaishak@usm.my

Received: 30 April 2025 | Accepted: 30 May 2025 | Published: 6 July 2025

Abstrak: Ketidakseimbangan antara keperluan pembangunan negara dan keperluan mendesak terhadap kelestarian alam sekitar menuntut anjakan paradigma dalam pendekatan pengajaran dan pembelajaran sains di sekolah. Selaras dengan aspirasi Kurikulum Standard Sekolah Menengah (KSSM) dan Dasar Pendidikan Kebangsaan yang menekankan integrasi pendidikan kelestarian serta pengupayaan teknologi hijau, kajian ini menilai keberkesanan pembelajaran berasaskan amali menggunakan teknologi Sel Bahan Bakar Mikro (*Microbial Fuel Cell*, MFC) terhadap pengetahuan kelestarian alam sekitar dan kemahiran manipulatif dalam kalangan murid Tingkatan Empat. Kajian ini dijalankan bagi mengatasi isu utama dalam pendidikan sains sekolah menengah, iaitu kekurangan pengetahuan tentang kelestarian alam sekitar dan tahap kemahiran manipulatif yang rendah. Kajian ini menggunakan reka bentuk pra-eksperimen satu kumpulan dengan penaksiran pra dan pasca ujian. Seramai 45 orang murid daripada dua buah sekolah menengah di Pulau Pinang telah dipilih secara bertujuan sebagai sampel kajian. Instrumen merangkumi ujian pengetahuan kelestarian alam sekitar dan rubrik penaksiran kemahiran manipulatif, manakala data dianalisis melalui ujian-t berpasangan menggunakan perisian SPSS versi 27.0. Dapatan menunjukkan peningkatan signifikan dalam kedua-dua domain selepas intervensi ($p < .05$), menolak hipotesis nol. Penemuan ini membuktikan keberkesanan pendekatan pedagogi kontekstual berasaskan MFC bukan sahaja dalam memperkukuh kefahaman terhadap isu kelestarian, malah meningkatkan kecekapan saintifik murid sejajar dengan hasrat membentuk generasi lestari berkemahiran tinggi. Implikasi kajian mencadangkan pengintegrasian teknologi bioelektrokimia secara sistematik dalam kurikulum sains serta peluasan modul pembelajaran ini ke peringkat menengah rendah sebagai strategi sokongan kepada pendidikan alam sekitar yang berimpak tinggi.

Kata kunci: Sel Bahan Bakar Mikroorganisma, teknologi hijau.

Abstract: The imbalance between national development demands and the urgent need for environmental sustainability calls for a paradigm shift in science teaching and learning approaches in schools. In line with the aspirations of the Secondary School Standard Curriculum (KSSM) and the National Education Policy—which emphasize the integration of sustainability education and the empowerment of green technology—this study evaluates the effectiveness of hands-on learning using Microbial Fuel Cell (MFC) technology in enhancing environmental sustainability knowledge and manipulative skills among Form Four students. The study addresses two major issues in secondary science education: insufficient understanding of environmental sustainability and low levels of manipulative skills. A one-group pre-experimental design with pre- and post-test assessments was employed. A total of 45 students from two secondary schools in Penang were purposively selected as the study sample. The instruments comprised a sustainability knowledge test and a manipulative skills assessment rubric, while the data were analyzed using paired sample t-tests via SPSS version 27.0. Findings revealed a statistically significant improvement in both domains following the intervention ($p < .05$), thus rejecting the null hypothesis. These results demonstrate the effectiveness of a contextual, MFC-based pedagogical approach not only in strengthening students' understanding of sustainability issues but also in enhancing their scientific competency, in line with the goal of nurturing a skilled and sustainability-conscious generation. The implications of the study suggest the systematic integration of bioelectrochemical technology into the science curriculum and the expansion of this learning module to lower secondary levels as a strategic support for impactful environmental education.

Keywords: Microbial Fuel Cell, Green Technology.

Cite This Article: Muaz Mohd Zaini Makhtar & Nor Asniza Ishak. 2025. Pendekatan Pembelajaran Amali Menggunakan Microbial Fuel Cell (MFC): Dampak Terhadap Pemahaman Kelestarian dan Kemahiran Saintifik Murid Tingkatan Empat [Hands-On Learning Approach Using Microbial Fuel Cell (MFC): Impact on Form Four Students' Understanding of Sustainability and Scientific Skills]. *Global Journal of Educational Research and Management (GERMANE)*, 5(3), 29-39.

PENGENALAN

Isu kelestarian alam sekitar kini berada pada tahap paling kritikal dalam sejarah pembangunan manusia, apabila tekanan terhadap sumber semula jadi, peningkatan pelepasan karbon, dan *degradasi* ekosistem telah menyebabkan ketidakseimbangan yang mengancam kesejahteraan generasi akan datang. Perubahan iklim yang semakin ekstrem dan pencemaran yang berleluasa membuktikan bahawa tindakan *mitigasi* perlu bermula dari akar umbi termasuk melalui pendidikan. Dalam hal ini, pendidikan kelestarian alam sekitar tidak lagi boleh dilihat sebagai pilihan tambahan, sebaliknya menjadi keperluan strategik yang perlu *diarusperdanakan* dalam sistem persekolahan. Namun, realiti semasa memperlihatkan jurang yang ketara antara dasar pendidikan dan amalan di bilik darjah. Pendekatan pedagogi sains di sekolah menengah masih terlalu tertumpu pada aspek teori dan hafalan, tanpa memberi ruang secukupnya kepada penerokaan konsep secara kontekstual dan amali. Hal ini menyebabkan ramai pelajar gagal memahami secara menyeluruh konsep teknologi hijau, apatah lagi mengaitkannya dengan tindakan lestari dalam kehidupan seharian.

Selaras dengan aspirasi Kurikulum Standard Sekolah Menengah (KSSM), Dasar Pendidikan STEM Negara serta Dasar Teknologi Hijau Negara 2021–2030, wujud keperluan mendesak untuk memperkenalkan pendekatan pedagogi yang bukan sahaja membina

pengetahuan saintifik, malah mampu memupuk kemahiran abad ke-21 seperti pemikiran kritikal, penyelesaian masalah dan kesedaran sivik alam sekitar. Justeru, integrasi teknologi hijau sebenar ke dalam pengalaman pembelajaran merupakan langkah progresif yang relevan dan perlu diperkukuhkan melalui kajian empirikal.

Dalam konteks ini, teknologi Sel Bahan Bakar Mikrob (Microbial Fuel Cell, MFC) menawarkan satu pendekatan pendidikan yang inovatif dan bersifat dwi-fungsi – iaitu memperkenalkan prinsip *bioelektrokimia* dalam konteks tenaga boleh diperbaharui dan pada masa yang sama berperanan sebagai alat pedagogi amali yang menyokong kemahiran manipulatif sains. MFC bukan sahaja memanfaatkan sisa organik sebagai sumber tenaga, tetapi juga menjadi contoh konkrit bagaimana sains dan teknologi boleh menyumbang kepada pembangunan mampan. Memandangkan teknologi MFC masih jarang diketengahkan di peringkat persekolahan, manuskrip ini menampilkan satu inovasi pedagogi yang signifikan: menguji secara empirikal keberkesanan pendekatan pembelajaran berasaskan amali MFC dalam meningkatkan pengetahuan kelestarian alam sekitar dan kemahiran manipulatif saintifik dalam kalangan murid tingkatan empat. Penemuan kajian ini diyakini mampu menyumbang kepada wacana pendidikan lestari secara lebih substantif, serta memberikan asas kukuh untuk integrasi sistematik teknologi bioelektrokimia dalam kurikulum kebangsaan.

Kajian ini bertujuan untuk menilai kesan Pembelajaran Berasaskan Amali Sel Bahan Bakar Mikroorganisma (MFC) terhadap pengetahuan kelestarian alam sekitar murid Tingkatan Empat. Selain itu, kajian ini juga bertujuan untuk menilai kesan pendekatan yang sama terhadap kemahiran manipulatif murid Tingkatan Empat.

Persoalan kajian ini adalah untuk menentukan sama ada terdapat perbezaan signifikan dalam pengetahuan kelestarian alam sekitar murid sebelum dan selepas intervensi menggunakan Pembelajaran Berasaskan Amali Sel Bahan Bakar Mikroorganisma (MFC). Selain itu, kajian ini juga ingin mengkaji sama ada terdapat perbezaan signifikan dalam kemahiran manipulatif murid sebelum dan selepas intervensi menggunakan pendekatan yang sama.

Hipotesis nul (H01) kajian ini menyatakan bahawa tidak terdapat perbezaan signifikan dalam pengetahuan kelestarian alam sekitar sebelum dan selepas intervensi menggunakan Pembelajaran Berasaskan Amali Sel Bahan Bakar Mikroorganisma (MFC). Manakala hipotesis nul (H02) pula menyatakan bahawa tidak terdapat perbezaan signifikan dalam kemahiran manipulatif sebelum dan selepas intervensi menggunakan pendekatan yang sama.

PENYATAAN MASALAH

Dalam era krisis iklim global dan ketidakpastian ekologi, pendidikan alam sekitar tidak lagi memadai jika hanya bersandar kepada pemindahan pengetahuan secara kognitif. Sebaliknya, pembentukan literasi kelestarian yang utuh menuntut penglibatan menyeluruh pada ranah afektif (nilai, sikap) dan psikomotor (kemahiran aplikasi). Malangnya, realiti pendidikan sains di peringkat sekolah menengah di Malaysia masih memperlihatkan wujudnya jurang pedagogi yang ketara antara apa yang diajar dan apa yang dialami secara praktikal oleh pelajar.

Kajian lapangan serta laporan prestasi pendidikan menunjukkan bahawa pendekatan pengajaran sedia ada – yang masih bersifat pasif, berorientasikan peperiksaan, dan tidak kontekstual – telah menyumbang kepada pembelajaran yang bersifat fragmentasi dan tidak signifikan dalam kehidupan pelajar. Ini menjejaskan usaha untuk melahirkan generasi pelajar yang celik kelestarian dan berkeupayaan menyelesaikan masalah alam sekitar secara saintifik dan inovatif. Dua isu utama berikut dikenal pasti sebagai cabaran kritikal:

1. Tahap Pengetahuan Kelestarian Alam Sekitar yang Rendah dan Terasing dari Konteks Kehidupan Sehari-hari: Pelajar cenderung menganggap isu kelestarian sebagai konsep yang abstrak, tidak relevan dan sukar dikaitkan dengan realiti harian. Kekurangan pendekatan pembelajaran berasaskan *inkuiri* dan kurangnya pendedahan kepada teknologi hijau sebenar dalam bilik darjah menyebabkan pembentukan pemikiran lestari yang bersifat dangkal dan *superficial*.
2. Kemahiran Manipulatif Sains yang Lemah dan Tidak Terintegrasi dengan Teknologi Terkini: Walaupun pelajar menjalani sesi eksperimen makmal secara berkala, kemahiran asas seperti penggunaan radas dengan selamat, pemprosesan data eksperimen, serta penaakulan saintifik masih berada pada tahap minimum. Ketiadaan pendedahan kepada aplikasi teknologi semasa seperti *bioelektrokimia*, tenaga boleh diperbaharui atau konsep MFC menjadikan pelajar sekadar pengikut prosedur, bukannya pemikir atau pencipta dalam dunia sains.

Ketiadaan intervensi inovatif yang menggabungkan teknologi sebenar dan aktiviti *hands-on* telah mengukuhkan lagi jurang ini. Oleh itu, pengenalan pembelajaran amali berasaskan Sel Bahan Bakar Mikroba (*Microbial Fuel Cell, MFC*) merupakan intervensi yang bukan sahaja menjawab keperluan pedagogi baharu dalam pendidikan sains, malah selari dengan agenda nasional seperti Dasar Pendidikan STEM Negara, Pelan Tindakan Pendidikan Alam Sekitar 2019–2025, dan Dasar Teknologi Hijau Negara 2030. Justeru, kajian ini tampil tepat pada waktunya untuk menilai keberkesanan intervensi tersebut dalam memperkukuh pengetahuan dan kemahiran saintifik pelajar secara holistik dan lestari.

KAJIAN LITERATUR

Pelbagai kajian telah menunjukkan bahawa pembelajaran amali berupaya meningkatkan motivasi dan penguasaan konsep saintifik murid (Abdullah, 2021; Zainal & Wahab, 2020). Integrasi teknologi hijau seperti MFC dalam pedagogi sains pula dilaporkan dapat meningkatkan kesedaran terhadap kelestarian (Hassan et al., 2022). Kajian oleh Karim et al. (2021) menyatakan bahawa murid yang terlibat dalam amali berasaskan MFC menunjukkan peningkatan minat terhadap bidang STEM serta kesedaran kelestarian alam sekitar.

Teori pendidikan yang relevan dalam konteks kajian ini termasuklah Teori Konstruktivisme yang diperkenalkan oleh Jean Piaget. Konstruktivisme menekankan bahawa pembelajaran berlaku apabila murid membina pengetahuan mereka sendiri melalui pengalaman dan interaksi dengan persekitaran mereka. Dalam konteks pembelajaran berasaskan amali, seperti yang diterapkan dalam eksperimen MFC, murid terlibat secara

langsung dalam proses eksperimen yang membolehkan mereka memahami konsep-konsep saintifik secara praktikal (Piaget, 1976). Aktiviti eksperimen yang berasaskan MFC membolehkan murid untuk mengaplikasikan teori kepada situasi dunia nyata, meningkatkan kefahaman mereka terhadap konsep kelestarian alam sekitar dan teknologi hijau (Fang and LePage, 2023).

Selain itu, Teori Pembelajaran Berasaskan Masalah (*Problem-Based Learning, PBL*) yang diperkenalkan oleh Howard Barrows juga berkait rapat dengan kajian ini. PBL melibatkan murid dalam situasi dunia nyata di mana mereka perlu menyelesaikan masalah yang kompleks dengan menggunakan pengetahuan sedia ada dan penyelidikan. Dalam kajian ini, pembelajaran berasaskan MFC menyarankan murid untuk menyelesaikan masalah berkaitan kelestarian alam sekitar dengan menggunakan teknologi hijau sebagai alat penyelesaian, yang menggalakkan mereka untuk berfikir secara kritis dan meneroka penyelesaian inovatif.

Teori-teori pendidikan ini memberikan asas yang kukuh untuk kajian ini, yang bertujuan untuk mengkaji bagaimana pendekatan pembelajaran berasaskan amali dapat meningkatkan pengetahuan kelestarian dan kemahiran manipulatif murid melalui penggunaan teknologi hijau seperti MFC (Suhaili & Hafsa 2021; Abdul Jalil 2024). Konsep-konsep ini bukan sahaja menyokong pemahaman saintifik murid, tetapi juga memupuk kesedaran terhadap isu-isu global yang semakin penting dalam konteks pendidikan sains abad ke-21.

Metodologi Kajian

Kajian ini menggunakan reka bentuk pra-eksperimen satu kumpulan dengan ujian pra dan pasca. Seramai 45 murid Tingkatan Empat daripada dua buah sekolah di Pulau Pinang menjadi sampel kajian, terdiri daripada 27 murid perempuan dan 18 murid lelaki dan pemilihan adalah secara rawak mudah. Sesi pembelajaran amali melibatkan pembinaan dan pengujian MFC dijalankan di makmal sains sekolah selama lapan minggu berturut-turut dalam bentuk pembelajaran berasaskan amali (hands-on), dengan penekanan kepada prinsip konstruktivisme aktif. Modul intervensi merangkumi:

1. Sesi teori interaktif: Pengenalan kepada konsep asas teknologi MFC, proses bioelektrokimia, dan hubungan dengan kelestarian alam sekitar.
2. Aktiviti pembinaan sistem MFC: Pelajar membina sendiri sel bahan bakar mikrob menggunakan bahan kitar semula seperti bekas plastik, karbon grafit dan elektrolit daripada sisa makanan.
3. Eksperimen penghasilan tenaga elektrik: Murid menjalankan eksperimen untuk mengukur voltan, arus dan kuasa yang dihasilkan daripada sisa organik tempatan.
4. Sesi refleksi dan diskusi saintifik: Pelajar berbincang secara berkumpulan tentang potensi impak teknologi MFC kepada komuniti dan alam sekitar, dengan bimbingan guru fasilitator.

Pendekatan ini membolehkan pelajar mengalami proses saintifik sebenar daripada perancangan, pelaksanaan hingga penilaian – selaras dengan aspirasi KSSM dan pembelajaran STEM.

Kajian ini turut melibatkan pentadbiran dua instrumen kajian iaitu; i) Ujian Pengetahuan Kelestarian Alam Sekitar (item objektif dan subjektif) yang mengukur tahap pemahaman pelajar terhadap konsep kelestarian, sumber tenaga boleh diperbaharui, dan aplikasi teknologi hijau dan; ii) Senarai Semak Kemahiran Manipulatif yang direka bentuk berdasarkan standard amali makmal sains KSSM. Rubrik ini merangkumi lima domain utama iaitu i. Penyediaan bahan dan radas, ii. Penggunaan alatan saintifik, iii. Pemantauan keselamatan makmal, iv. Pengumpulan dan pencatatan data, dan v. Penganalisan dan pentafsiran hasil eksperimen.

Rubrik ini dinilai oleh guru sains melalui pemerhatian sepanjang aktiviti intervensi, menggunakan skala 4-tahap (Sangat Lemah hingga Cemerlang).

Data bagi pra ujian dan pasca ujian kedua-dua instrumen telah dianalisis menggunakan statistik diskriptif dan statistik inferensi menggunakan analisis ujian-t berpasangan pada tahap signifikan (p) $< .05$ dan dianalisis menggunakan perisian IBM SPSS versi 27.0

PEMBANGUNAN MODUL PEMBELAJARAN BERASASKAN AMALI SEL BAHAN BAKAR MIKROORGANISMA (MFC)

Modul pembelajaran ini dibangunkan sebagai intervensi kajian menggunakan model reka bentuk pengajaran ADDIE, yang merangkumi lima fasa utama: Analisis, Reka Bentuk (Design), Pembangunan (Development), Pelaksanaan (Implementation), dan Penilaian (Evaluation).

Analisis keperluan

Murid-murid dikenal pasti mempunyai kekurangan dari segi pengetahuan berkaitan teknologi hijau serta kemahiran manipulatif yang relevan dengan sains moden. Penilaian awal ini dilakukan melalui tinjauan lapangan dan sokongan dapatan literatur semasa. Selain itu, isu kemerosotan alam sekitar yang semakin kritikal menjadi asas penting dalam merangka keperluan kepada pendekatan pembelajaran yang lebih lestari dan bermakna.

Reka Bentuk dan Pembangunan Modul Berfokuskan Amali MFC

Satu modul berfokuskan pembelajaran amali berasaskan MFC telah dibangunkan secara sistematik, dengan pendekatan konstruktivis yang menekankan penglibatan aktif murid dalam eksperimen dunia sebenar. Modul ini direka bentuk untuk membolehkan murid memahami konsep kelestarian melalui teknologi hijau sambil mengasah kemahiran saintifik dan teknikal dalam membina serta menilai keberkesanan sistem MFC. Ia terdiri daripada empat komponen utama, iaitu: (1) Pengenalan kepada Teknologi MFC dan Kelestarian Alam Sekitar; (2) Panduan Langkah demi Langkah Pembinaan MFC; (3) Aktiviti Pengujian dan Penilaian

Output Tenaga daripada MFC; dan (4) Refleksi serta Perbincangan tentang Aplikasi Teknologi Hijau dalam kehidupan seharian. Modul ini turut disertakan dengan bahan bantu visual, video interaktif, senarai semak kemahiran manipulatif, dan panduan keselamatan makmal yang menitikberatkan penggunaan bahan mesra alam serta penerapan prinsip saintifik yang betul. Instrumen penilaian termasuk skala Likert dan senarai semak digunakan untuk mengukur tahap kemahiran murid secara holistik dari aspek teknikal dan saintifik.

Fasa Pelaksanaan

Modul ini digunakan dalam sesi pengajaran sains yang ditetapkan kepada kumpulan eksperimen yang terlibat. Murid melaksanakan aktiviti pembinaan dan pengujian MFC secara berkumpulan, dengan guru memainkan peranan sebagai fasilitator yang membimbing proses pembelajaran. Seterusnya,

Fasa Penilaian

Fasa penilaian dijalankan melalui perbandingan skor pra dan pasca ujian melibatkan dua domain utama: (i) pengetahuan kelestarian alam sekitar, dan (ii) kemahiran manipulatif. Di samping itu, maklum balas murid turut dikumpul bagi menilai keberkesanan kandungan dan kaedah pengajaran dalam modul serta mengenal pasti ruang penambahbaikan untuk pelaksanaan akan datang. Secara keseluruhannya, pendekatan ini menyokong pembangunan pedagogi saintifik yang lebih kontekstual dan relevan dengan isu semasa.

Melalui penggunaan model ADDIE dan fokus terhadap amali saintifik, pembangunan modul ini menyasarkan pembelajaran yang lebih bermakna, aktif, dan kontekstual serta menyokong pembangunan kesedaran murid terhadap isu kelestarian dan penyelesaian inovatif melalui teknologi hijau.

ANALISIS DATA

Ujian normaliti Shapiro-Wilk menunjukkan nilai $p > .05$ bagi semua pemboleh ubah seperti di Jadual 1.

Jadual 1 Ujian Kenormalan Shapiro-Wilk

Ujian	Nilai p
Pengetahuan Alam Sekitar (Pra)	$p = 0.086$
Pengetahuan Alam Sekitar (Pasca)	$p = 0.114$
Kemahiran Manipulatif (Pra)	$p = 0.072$
Kemahiran Manipulatif (Pasca)	$p = 0.093$

Maklumat dapatan statistik diskriptif adalah seperti di Jadual 2.

Jadual 2 Min dan Sisihan Piawai Skor Pengetahuan dan Kemahiran Manipulatif Sebelum dan Selepas Intervensi

Pemboleh Ubah	Min Pra	SP Pra	Min Pasca	SP Pasca
Pengetahuan Alam Sekitar	53.24	6.12	67.89	5.87
Kemahiran Manipulatif	3.12	0.41	4.01	0.35

Dapatan analisis statistik diskriptif ujian-t berpasangan adalah seperti di Jadual 3.

Jadual 3 Ujian-t Berpasangan Skor Sebelum dan Selepas Intervensi

Pemboleh Ubah	t	df	p
Pengetahuan Alam Sekitar	-6.238	44	< .001
Kemahiran Manipulatif	-7.014	44	< .001

Berdasarkan Jadual 3, kedua-dua H_{01} dan H_{02} adalah ditolak. Justeru, terdapat peningkatan signifikan dalam skor pengetahuan kelestarian alam sekitar selepas intervensi, $t(44) = -6.238$, $p < .001$. Min skor meningkat daripada 53.24 (SP = 6.12) kepada 67.89 (SP = 5.87). Begitu juga, kemahiran manipulatif menunjukkan peningkatan signifikan, $t(44) = -7.014$, $p < .001$, dengan min meningkat daripada 3.12 (SP = 0.41) kepada 4.01 (SP = 0.35).

Penemuan ini menunjukkan bahawa intervensi pembelajaran amali menggunakan MFC mempunyai kesan positif terhadap pemahaman konsep kelestarian dan penguasaan kemahiran manipulatif murid Tingkatan Empat.

PERBINCANGAN

Hasil kajian menunjukkan bahawa pembelajaran berasaskan amali menggunakan Sel Bahan Bakar Mikroorganisma (MFC) memberi kesan positif yang signifikan terhadap peningkatan pengetahuan kelestarian alam sekitar dan kemahiran manipulatif dalam kalangan murid Tingkatan Empat. Penemuan ini adalah selaras dengan kajian lepas yang menunjukkan bahawa pendekatan amali dapat meningkatkan pemahaman murid terhadap konsep-konsep saintifik serta mendorong penglibatan aktif dalam pembelajaran (Abdullah, 2021; Zainal & Wahab, 2020). Kajian ini juga memperkukuh dapatan yang menunjukkan bahawa pembelajaran berasaskan teknologi hijau berupaya meningkatkan kesedaran murid terhadap kelestarian alam sekitar (Hassan et al., 2022; Karim et al., 2021).

Peningkatan pengetahuan kelestarian alam sekitar yang ditemui dalam kajian ini adalah selaras dengan kajian-kajian terdahulu yang menekankan bahawa pengenalan teknologi hijau dalam pendidikan sains mampu memberikan impak yang positif terhadap kesedaran alam sekitar dalam kalangan murid (Hassan et al., 2022). Kajian oleh Karim et al. (2021) juga menyokong dapatan ini dengan menunjukkan bahawa murid yang terlibat dalam pembelajaran amali berasaskan MFC mempunyai kesedaran yang lebih tinggi terhadap isu-isu kelestarian dan kepentingan penggunaan teknologi hijau dalam kehidupan seharian mereka. Aktiviti MFC memberikan murid pengalaman langsung yang dapat menghubungkan

teori dengan amalan sebenar, seterusnya meningkatkan pemahaman mereka tentang bagaimana teknologi hijau dapat dimanfaatkan untuk mengurangkan kesan negatif terhadap alam sekitar (Wan & Halim, 2021; Man et al, 2023).

Dalam hal kemahiran manipulatif, dapatan kajian menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kebolehan murid untuk melaksanakan eksperimen saintifik dengan lebih berkesan. Ini sejajar dengan kajian oleh Zainal dan Wahab (2020), yang mendapati bahawa pendekatan pembelajaran amali memberikan peluang kepada murid untuk menguasai kemahiran teknikal yang penting dalam konteks sains. Kemahiran manipulatif adalah aspek penting dalam pendidikan sains kerana ia membantu murid untuk membina keyakinan diri dalam melaksanakan eksperimen dan membuat inferens saintifik yang tepat.

Secara keseluruhan, hasil kajian ini menyokong teori konstruktivisme yang menekankan pembelajaran melalui pengalaman praktikal dan interaksi langsung dengan objek pembelajaran (Piaget, 1973). Dalam konteks ini, pendekatan amali berasaskan MFC memberikan murid pengalaman belajar yang bermakna yang memperkukuhkan pemahaman mereka terhadap konsep sains, kelestarian alam sekitar, dan kemahiran praktikal. Pembelajaran sebegini juga selaras dengan Matlamat Pembangunan Mampan (SDG) yang memfokuskan kepada pendidikan yang berkualiti dan peningkatan kesedaran terhadap isu-isu alam sekitar (Tan & Lee, 2022).

Namun, terdapat beberapa halangan yang dihadapi dalam pelaksanaan kajian ini, antaranya adalah keterbatasan sumber peralatan dan latihan guru. Keberkesanan aktiviti amali seperti MFC sangat bergantung kepada ketersediaan bahan-bahan yang sesuai dan latihan yang mencukupi bagi guru-guru untuk memfasilitasi eksperimen tersebut dengan berkesan. Oleh itu, adalah penting untuk menyediakan sokongan yang mencukupi kepada guru dan memastikan kemudahan makmal yang mencukupi untuk menyokong pelaksanaan aktiviti-aktiviti seperti ini.

Secara kesimpulannya, kajian ini memberi impak yang besar dalam menggalakkan pendidikan sains yang mengintegrasikan teknologi hijau, serta menyokong inisiatif kelestarian alam sekitar. Pendekatan pembelajaran amali yang melibatkan penggunaan MFC berpotensi untuk memupuk minat murid dalam bidang STEM dan meningkatkan kesedaran mereka terhadap isu-isu alam sekitar. Oleh itu, pelaksanaan pendekatan ini dalam kurikulum sains perlu dipertimbangkan secara serius, terutama dalam usaha untuk menghasilkan generasi murid yang lebih peka terhadap cabaran alam sekitar dan bersedia untuk mengambil langkah-langkah untuk menghadapinya.

CADANGAN KAJIAN LANJUTAN DAN KESIMPULAN

Bagi memperkaya lagi pemahaman tentang keberkesanan pembelajaran berasaskan amali Sel Bahan Bakar Mikroorganisma (MFC), adalah dicadangkan agar kajian ini diperluas ke peringkat menengah rendah untuk melihat kesan yang serupa dalam kalangan murid yang lebih muda. Kajian lanjutan juga boleh menggunakan reka bentuk kuasi-eksperimen yang melibatkan kumpulan kawalan bagi membolehkan perbandingan yang lebih jelas antara murid yang terlibat dalam pembelajaran amali dan mereka yang tidak. Selain itu, kajian jangka panjang yang menilai perubahan sikap, pemahaman, dan nilai kelestarian selepas

tempoh masa yang lebih panjang boleh memberi gambaran yang lebih holistik tentang keberkesanan pendekatan ini. Ini juga boleh membantu dalam mengukur impak jangka panjang terhadap minat murid dalam bidang STEM dan kesedaran mereka terhadap isu kelestarian alam sekitar.

Sebagai Kesimpulan, pembelajaran Berasaskan Amali menggunakan Sel Bahan Bakar Mikroorganisma (MFC) terbukti berkesan dalam meningkatkan pengetahuan kelestarian dan kemahiran manipulatif murid. Pendekatan ini harus dipertimbangkan secara serius dalam pendidikan sains untuk menyokong aspirasi kelestarian dan pembangunan teknologi hijau.

PENGHARGAAN

Kajian ini merupakan kajian yang dibiayai oleh Geran Agensi Antarabangsa Changsa Daqin Network (R504-LR-GAL008-0000000991-0000), Geran Apex Era (R502-KR-ARU004-0000881004-K134 & R502-KR-ARU004-0000881007-K134) oleh Universiti Sains Malaysia

RUJUKAN

- Abdul Jalil, N. F. ., Hasran, U. A., Mat Noor, S. F. ., & Norman, M. H. . (2024). A review of game-based learning in fuel cell education for secondary students . *Malaysian Journal of Chemical Engineering and Technology*, 7(2), 237–256.
- Abdullah, R. (2021). *Pendekatan STEM dalam Pendidikan Sains*. Kuala Lumpur: Dewan Bahasa dan Pustaka.
- Fang, W. T., Hassan, A., & LePage, B. A. (2023). Introduction to Environmental Education. Dalam *The Living Environmental Education*. Springer. DOI: 10.1007/978-981-19-4234-1_1
- Hassan, S., Ahmad, N., & Lee, W. (2022). Integrating Green Technology in Science Classrooms. *International Journal of STEM Education*, 9(1), 44–52.
- Karim, A., Yusof, N., & Rahman, H. (2021). Microbial Fuel Cells in Malaysian Science Education: A Pilot Study. *Journal of Environmental Science Education*, 16(2), 102–113.
- Man, S. R., Ishak, N. A., & Makhtar, M. M. Z. (2023). Integration of Microbial Fuel Cell (MFC) in Secondary School: An Approach of Environmental Education to Improve Students' Knowledge on Green Technology and Manipulative Skills in Biology Subject. *Global Journal of Educational Research and Management*, 3(1), 211-228
- Piaget, J. (1976). *To Understand is to inveny: The Future of education*. New York: Penguin Books.
- Suhaili Mohd Sarjidi & Hafsa Taha (2021). Keberkesanan Amali Kimia Hijau terhadap Pencapaian dan Kesedaran Kelestarian Pelajar Tingkatan 4. *Malaysian Journal of Social Sciences and Humanities*, 6(8), 261-268
- Tan, T. T. M., & Lee, Y.-J. (2022). Building improvised microbial fuel cells: A model integrated STEM curriculum for middle-school learners in Singapore. *Education Sciences*, 12(6), 417

- Wan Nur Hafizah W. Hussain, L. Halim, et al. (2021). Kelakuan Penjimatan Tenaga Berdasarkan Nilai Alam Sekitar: Perspektif Murid Sekolah. *Sustainability* 455-485
- Yean, A. S., & Abdul Rahim, S. S. (2021). Greening STEM: A Theoretical Exploration for the Malaysian Context. *Journal of International and Comparative Education*, 10(1), 19–32.
- Zainal, Z., & Wahab, S. (2020). Kemahiran Manipulatif dalam Pendidikan Sains Sekolah Menengah. *Jurnal Pendidikan Malaysia*, 45(3), 33–41.