



## Pemberdayaan generasi muda dalam transisi energi hijau melalui pelatihan teknologi *fuel cell*

### *Empowering young generation in the green energy transition through fuel cell technology training*

Iswandi<sup>1</sup>, Supriatno<sup>2</sup>, Susilawati<sup>3\*</sup>, Tino Hermanto<sup>4</sup>, Samsul Abdul Rahman Sidik Hasibuan<sup>5</sup>, Rizki Muliono<sup>6</sup>, Ida Royani<sup>7</sup>, Yopan Rahmad Aldori<sup>8</sup>

<sup>1,2,4,8</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Medan Area, Sumatra Utara, 20223, Indonesia

<sup>3,6</sup> Program Studi Teknik Informatika, Universitas Medan Area, Sumatra Utara, 20223, Indonesia

<sup>5</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Medan Area, Sumatra Utara, 20223, Indonesia

<sup>7</sup> Program Studi Manajemen, Universitas Medan Area, Sumatra Utara, 20223, Indonesia

\*e-mail korespondensi: [susilawati@staff.uma.ac.id](mailto:susilawati@staff.uma.ac.id)

Pengiriman: 17/Mei/2025; Diterima: 26/Mei/2025; Publikasi: 29/Mei/2025

DOI: <https://doi.org/10.31629/anugerah.v7i1.7174>

**Untuk Kutipan:** Iswandi, I., Supriatno, S., Susilawati, S., Hermanto, T., Hasibuan, S. A. R. S., Muliono, R., ... Aldori, Y. R. (2025). Pemberdayaan generasi muda dalam transisi energi hijau melalui pelatihan teknologi *fuel cell*. *Jurnal Anugerah*, 7(1), 99–108. <https://doi.org/10.31629/anugerah.v7i1.7174>

#### Abstrak

Krisis energi global dan rendahnya literasi energi bersih di kalangan pelajar mendorong perlunya edukasi teknologi alternatif yang berkelanjutan. Kegiatan pengabdian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan untuk meningkatkan wawasan siswa terhadap teknologi energi terbarukan, khususnya *fuel cell*. Tujuan kegiatan ini adalah untuk memperkenalkan prinsip dasar kerja teknologi *fuel cell* serta membangun pemahaman dan keterampilan awal siswa Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) sebagai bagian dari edukasi transisi energi hijau. Pengumpulan data dilakukan sebagai langkah evaluatif untuk meninjau keberhasilan kegiatan PkM. Tolok ukur keberhasilan ditentukan berdasarkan peningkatan pemahaman kognitif siswa serta tingkat partisipasi dan respons positif terhadap materi pelatihan. Metode pelaksanaan menggunakan pendekatan pelatihan interaktif, pendidikan masyarakat, dan substitusi ipteks. Peserta kegiatan berjumlah lebih dari 50 siswa jurusan Bisnis dan Manajemen di SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa. Teknik pengumpulan data mencakup *pre-test* dan *post-test* untuk mengukur peningkatan pemahaman, observasi untuk menilai keterlibatan siswa, serta wawancara semi-terstruktur untuk menggali persepsi dan ketertarikan siswa terhadap teknologi energi bersih. Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dan naratif. Hasil menunjukkan adanya peningkatan skor pemahaman peserta dari 42% menjadi 81%, disertai partisipasi aktif dan ketertarikan tinggi terhadap materi. Peserta juga mampu mengaitkan prinsip kerja *fuel cell* dengan peluang usaha berbasis energi bersih. Kegiatan ini membuktikan bahwa edukasi ipteks lintas disiplin dapat menjembatani kesenjangan pemahaman teknologi dan membentuk kesadaran *technopreneurship*. Oleh karena itu, model pelatihan ini berpotensi diterapkan secara lebih luas dalam satuan pendidikan vokasi non-teknik untuk mendukung transisi energi nasional.

Kata kunci: edukasi energi; *fuel cell*; ipteks terapan; siswa SMK; transisi energi



### **Abstract**

*The global energy crisis and the low level of clean energy literacy among students highlight the need for sustainable alternative technology education. This community service program was initiated to improve students' understanding of renewable energy technologies, particularly fuel cell systems. The objective was to introduce the basic operating principles of fuel cell technology and to develop foundational knowledge and technical skills among vocational high school (SMK) students as part of green energy transition education. Data collection was conducted as an evaluative measure to assess the effectiveness of the program. The success indicators included measurable improvements in students' cognitive understanding and active engagement during the training. The activity applied an integrated approach combining interactive training, community-based education, and ipteks substitution. More than 50 students from the Business and Management Department at SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa participated. Data collection techniques included pre-test and post-test to evaluate knowledge gains, structured observation to assess student participation, and semi-structured interviews to explore perceptions and interests in clean energy technologies. Data were analyzed using descriptive quantitative and narrative methods. Results indicated an increase in student comprehension scores from 42% to 81%, along with high levels of participation and enthusiasm. Participants were also able to connect the working principles of fuel cells with potential entrepreneurial opportunities in the green energy sector. This program demonstrates that cross-disciplinary ipteks education can effectively bridge knowledge gaps and foster technopreneurship awareness. Thus, this training model has strong potential for wider application in non-technical vocational education institutions to support the national energy transition agenda.*

*Keywords: applied technology; energy education; fuel cell; green transition; vocational students*

### **Pendahuluan**

Pendidikan Krisis energi global dan peningkatan emisi gas rumah kaca merupakan tantangan besar bagi peradaban modern. Kedua isu ini menjadi fokus utama dalam agenda pembangunan berkelanjutan di berbagai negara. Sektor transportasi dan industri diketahui menyumbang lebih dari 30% emisi karbon dioksida global (Gota, Huizenga, Peet, Medimorec & Bakker, 2019; Creutzig et al., 2015). Ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil tidak hanya memicu pencemaran udara, tetapi juga berdampak buruk terhadap kesehatan manusia. Berbagai studi menunjukkan bahwa paparan emisi fosil berkaitan erat dengan hipoksia, gangguan sistem saraf, serta peningkatan risiko penyakit jantung dan pernafasan (Marais et al., 2019; Zhang, Cai & Liu, 2018).

Di Indonesia, transisi menuju energi bersih menghadapi berbagai hambatan. Salah satu tantangan utama adalah kurangnya kesiapan sumber daya manusia, khususnya di tingkat pendidikan menengah kejuruan (Sudirjo, Arifin & Wibowo, 2023; Putri & Suprpto, 2022). Padahal, generasi muda dari jenjang SMK berperan penting dalam mendukung adopsi teknologi baru pada masa depan.

Salah satu teknologi energi bersih yang potensial untuk dikenalkan sejak dini adalah *fuel cell* atau sel bahan bakar. Teknologi ini mampu menghasilkan energi listrik melalui reaksi elektrokimia antara hidrogen dan oksigen tanpa proses pembakaran dan tanpa menghasilkan emisi berbahaya (Dincer & Acar, 2015; Barbir, 2020). Selain relevan dengan agenda *net-zero emission*, *fuel cell* juga dapat menjadi materi pembelajaran kontekstual yang menarik bagi siswa SMK, terutama dalam penguatan literasi sains dan teknologi (Raza, Rehan & Khan, 2021). Sayangnya, tingkat literasi siswa terhadap teknologi ini masih sangat rendah. Minimnya paparan materi dan belum adanya pelatihan aplikatif menyebabkan pemahaman mereka terbatas secara teoretis maupun praktis (Hidayat, Nursyam & Ramadhan, 2019; Sari, Mulyani & Rachmad 2023).

Kegiatan pelatihan energi bersih yang telah dilaksanakan di berbagai sekolah di Indonesia umumnya masih berfokus pada teknologi surya dan turbin angin (Yuwono, Sulastris & Rachmawati, 2020). Hanya sedikit yang secara spesifik mengangkat topik *fuel cell* sebagai fokus utama. Misalnya, kegiatan oleh Surya, Prasetyo & Hidayat, (2020) di SMK Negeri 1 Tasikmalaya hanya mengenalkan konsep energi terbarukan secara umum

tanpa demonstrasi langsung teknologi *fuel cell*. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan dalam pendekatan edukatif terhadap teknologi energi bersih yang lebih spesifik dan aplikatif (Rohman & Wulandari, 2021).

Temuan ini diperkuat melalui observasi awal dan diskusi dengan pihak SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa. Sebagian besar siswa mengaku belum pernah mendengar istilah *fuel cell*, apalagi memahami prinsip kerjanya. Untuk memperjelas kondisi tersebut, tim pengabdian melakukan penyebaran kuesioner kepada 20 siswa kelas XI jurusan Bisnis dan Manajemen yang menjadi calon peserta pelatihan. Kuesioner terdiri dari lima pertanyaan tertutup yang menguji pemahaman dasar terkait teknologi energi terbarukan. Hasilnya menunjukkan bahwa hanya 10% (2 siswa) yang pernah mendengar istilah *fuel cell*, dan tidak ada yang mengetahui cara kerjanya. Selain itu, dalam dokumen kurikulum sekolah juga tidak ditemukan muatan materi energi bersih pada mata pelajaran jurusan Bisnis dan Manajemen. Hal ini memperkuat dugaan bahwa rendahnya literasi energi bersih disebabkan oleh keterbatasan kurikulum dan akses informasi. Minimnya eksposur terhadap isu energi menjadi kendala serius dalam membangun kesadaran lingkungan dan kesiapan generasi muda menghadapi tantangan transisi energi global.

Merespons kondisi tersebut, tim dari Fakultas Teknik Universitas Medan Area melaksanakan kegiatan pelatihan bertema “*Inovasi Energi Bersih: Eksplorasi Teknologi Fuel Cell*” di SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa pada Sabtu, 19 April 2025. Pelatihan berdurasi satu jam ini difasilitasi oleh Dr. Iswandi, ST, MT, dan berfokus pada pengenalan prinsip kerja *fuel cell*, manfaatnya terhadap lingkungan dan kesehatan, serta potensi aplikasinya di Indonesia. Dokumentasi kegiatan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Suasana pelatihan *fuel cell* di SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa

Secara teoretis, *fuel cell* tersusun atas anoda, katoda, elektrolit, dan katalis, yang berperan dalam sistem tertutup menghasilkan energi listrik dan air (Rayment & Sherwin, 2019). Salah satu jenis yang umum digunakan dalam edukasi adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* karena karakteristiknya yang ringan, cepat merespons, dan efisien (Nguyen & Ward, 2018; Zhou, Xie & Li, 2019). Materi ini kemudian dikaitkan dengan pendekatan *contextual teaching and learning* yang memungkinkan siswa mengalami pembelajaran secara langsung melalui demonstrasi dan diskusi (Suyanto, 2020; Sanjaya & Fitriyah, 2022; Mustadi & Nurohman, 2017). Beberapa pendekatan terbaru bahkan telah mengintegrasikan *digital game-based learning* untuk memperkenalkan konsep *fuel cell* dalam konteks pembelajaran interaktif dan kesadaran emisi karbon rendah (Jalil, Hasran, Noor & Norman, 2024).

Kegiatan ini dirancang sebagai strategi edukasi transformatif untuk meningkatkan pemahaman siswa terhadap teknologi energi bersih, sekaligus memperkuat kapasitas mereka dalam menghadapi tantangan revolusi energi masa depan (Utami, Kurniawan & Farida, 2023). Pelatihan ini juga bertujuan membentuk motivasi dan minat siswa untuk mengembangkan ide kewirausahaan berbasis teknologi hijau (Hikmawati, Surya & Mustofa, 2020; Fitriani, Supriyanto & Widodo, 2021). Efektivitas kegiatan dievaluasi melalui tiga instrumen, yaitu *pre-test* dan *post-test* untuk mengukur peningkatan pemahaman kognitif, lembar observasi untuk menilai partisipasi siswa, serta wawancara semi-terstruktur untuk merekam persepsi dan refleksi peserta. Rata-rata skor peserta meningkat dari 42% menjadi 81%, yang menunjukkan dampak signifikan terhadap pemahaman mereka. Selain itu, wawancara menunjukkan bahwa sebagian besar siswa mulai melihat peluang usaha dari teknologi ini. Meskipun tindak lanjut jangka panjang belum dilakukan, hasil awal ini memperkuat bahwa pelatihan lintas disiplin berbasis *ipteks* memiliki potensi besar dalam meningkatkan literasi teknologi dan kesadaran *technopreneurship* di kalangan siswa vokasi non-teknik.

### Metode

Kegiatan pengabdian ini menggunakan pendekatan kombinasi berupa pelatihan berbasis demonstrasi interaktif, pendidikan masyarakat, dan substitusi *ipteks*. Substitusi *ipteks* dalam konteks ini merujuk pada pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menggantikan ketergantungan terhadap energi fosil dengan alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti teknologi *fuel cell*. Meskipun peserta berasal dari jurusan Bisnis dan Manajemen, pendekatan lintas disiplin diterapkan agar materi tetap mudah dipahami dan relevan dengan konteks kewirausahaan energi bersih pada masa depan.

Pelaksanaan kegiatan dilakukan pada Sabtu, 19 April 2025, pukul 12.00 hingga 13.00 WIB di aula utama SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa. Kegiatan pelatihan *fuel cell* ini diikuti oleh lebih dari 50 siswa kelas XI jurusan Bisnis dan Manajemen. Peserta dipilih oleh pihak sekolah berdasarkan keterlibatan dalam organisasi siswa dan minat terhadap isu lingkungan. Untuk memaksimalkan interaksi dalam waktu yang terbatas, peserta diarahkan untuk duduk berkelompok dan berpartisipasi aktif dalam diskusi selama sesi berlangsung.

Kegiatan terbagi dalam lima tahap terstruktur: pembukaan, penyampaian materi, demonstrasi, tanya jawab, dan evaluasi sederhana. Penyampaian materi dilakukan selama  $\pm 15$  menit menggunakan slide PowerPoint, animasi, dan video singkat. Materi menekankan pada prinsip dasar kerja *fuel cell* dan urgensi transisi energi. Gambar 2 menunjukkan suasana saat narasumber memperkenalkan konsep *fuel cell* secara visual kepada siswa SMK Bisnis dan Manajemen. Selanjutnya, dilakukan demonstrasi langsung selama  $\pm 15$  menit menggunakan *PEM fuel cell demonstrator* untuk memperlihatkan reaksi elektrokimia nyata antara hidrogen dan oksigen. Gambar 3 memperlihatkan momen demonstrasi prinsip kerja *fuel cell* yang menjadi titik fokus pembelajaran kontekstual.

Sesi tanya jawab terbuka dilaksanakan selama  $\pm 10$  menit dan mendorong partisipasi seluruh peserta. Setelahnya, siswa mengisi *post-test* sederhana dan menyampaikan refleksi melalui catatan tanggapan singkat.

Refleksi dilakukan secara kolektif dan diarahkan oleh fasilitator sebagai penutup sesi. Tabel 1 merangkum alur kegiatan, peran pelaksana, teknik pelaksanaan, dan metode evaluasi yang dilakukan selama sesi pelatihan satu jam ini.

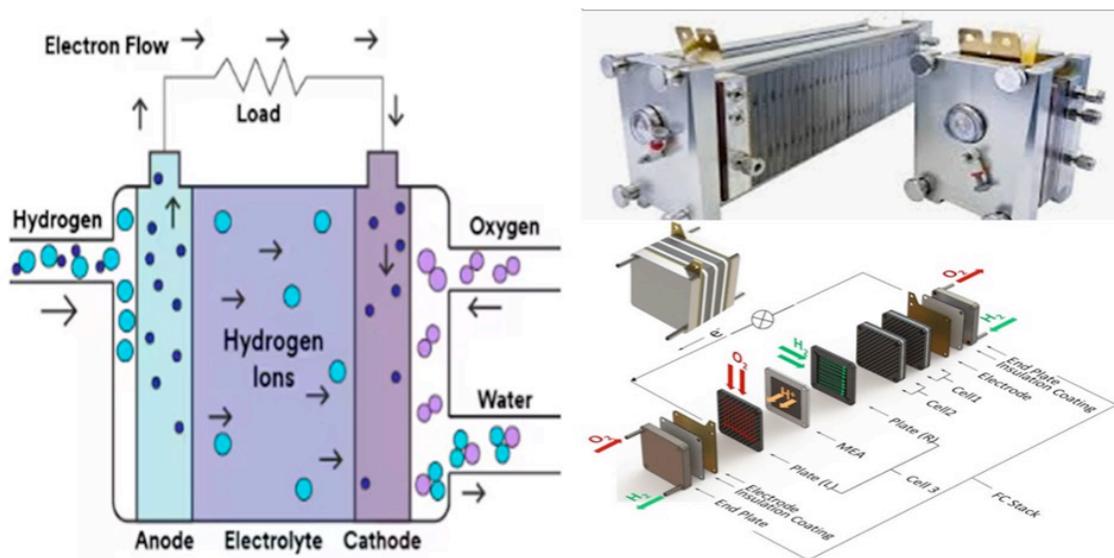
Tabel 1.

Ringkasan Tahapan Kegiatan dan Evaluasi Pelatihan (60 Menit)

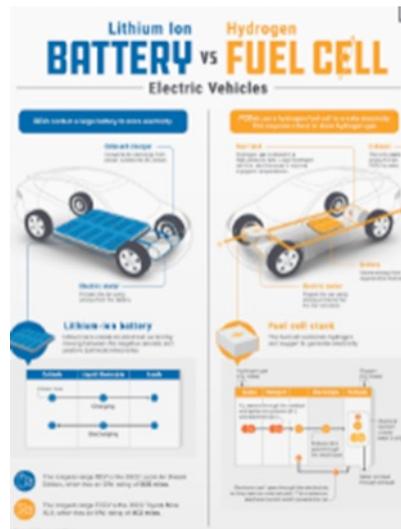
Tahapan Kegiatan	Aktivitas	Pelaksana	Teknik	Pengumpulan Data
Pembukaan	Penjelasan tujuan kegiatan	Moderator	Ceramah interaktif	-
Penyampaian Materi	Presentasi multimedia (PPT, video, animasi)	Narasumber	Visual komunikatif	-
Demonstrasi	Simulasi alat <i>PEM fuel cell</i>	Narasumber & Tim	<i>Hands-on</i> demonstrasi	Observasi
Tanya Jawab	Diskusi interaktif (terbuka untuk seluruh peserta)	Moderator	Diskusi terbuka	Observasi
<i>Post-test</i> & Refleksi	Pengisian kuis & tanggapan tertulis peserta	Fasilitator	Kuis & catatan refleksi	Kuesioner, Catatan siswa

Evaluasi kegiatan dilakukan melalui tiga instrumen utama. Pertama, *pre-test* dilakukan sehari sebelum kegiatan melalui Google Form, dan *post-test* dilaksanakan di akhir sesi dengan lima soal pilihan ganda untuk mengukur peningkatan pemahaman dasar peserta. Kedua, lembar observasi digunakan oleh tim pelaksana untuk mencatat keaktifan peserta selama sesi berlangsung. Ketiga, wawancara semi-terstruktur dilakukan terhadap lima siswa terpilih pasca kegiatan, dengan pertanyaan seperti: “Apa yang Anda pahami tentang *fuel cell*?”, dan “Apakah teknologi ini relevan dengan peluang usaha di masa depan?”

Analisis *pre-test* dan *post-test* dilakukan secara deskriptif kuantitatif untuk menghitung selisih skor rata-rata. Sementara itu, hasil observasi dan wawancara dianalisis secara naratif untuk menggali tema-tema pemahaman, minat siswa, dan indikasi awal kesadaran *technopreneurship*. Pendekatan kombinitif ini memungkinkan evaluasi yang efektif meskipun dalam waktu pelatihan yang terbatas.



Gambar 2. Pengenalan *fuel cell* dalam pelatihan kepada siswa SMK Bisnis dan Manajemen



Gambar 3. Prinsip kerja *fuel cell* dalam pelatihan kepada siswa SMK Bisnis dan Manajemen

### Hasil dan Pembahasan

Tahap Kegiatan pelatihan teknologi *fuel cell* yang dilaksanakan di SMK Swasta Nurul Amaliyah Tanjung Morawa memberikan hasil yang menggembirakan dalam hal peningkatan pemahaman siswa terhadap konsep energi bersih dan prinsip dasar kerja sel bahan bakar. Seperti dijelaskan dalam Tabel 1 pada bagian metode, kegiatan berlangsung dalam lima tahap utama, yaitu: pembukaan, penyampaian materi, demonstrasi, tanya jawab, dan refleksi. Tahapan ini dilaksanakan secara efektif dalam durasi 60 menit dengan pendekatan padat namun tetap komunikatif.

Evaluasi kognitif dilakukan melalui *pre-test* dan *post-test* yang masing-masing terdiri dari lima soal pilihan ganda. Soal-soal ini dirancang untuk mengukur empat aspek pemahaman dasar siswa, yaitu: (1) pengertian umum tentang *fuel cell*, (2) prinsip reaksi elektrokimia, (3) manfaat *fuel cell* bagi lingkungan dan kesehatan, dan (4) potensi penerapannya dalam kehidupan sehari-hari. Berdasarkan hasil pengolahan data, rata-rata skor *pre-test* peserta adalah 42%, sedangkan rata-rata skor *post-test* meningkat menjadi 81%. Dengan demikian, terjadi peningkatan pemahaman sebesar 39 poin persentase. Tabel 2 berikut merangkum hasil evaluasi tersebut.

Tabel 2.

Rata-rata Skor *Pre-test* dan *Post-test* Peserta Pelatihan

Jenis Tes	Rata-rata Skor (%)
<i>Pre-test</i>	42
<i>Post-test</i>	81

Peningkatan ini menunjukkan bahwa penyampaian materi dan demonstrasi teknologi *fuel cell* secara langsung memiliki dampak signifikan terhadap pemahaman peserta, meskipun mayoritas dari mereka berasal dari latar belakang non-teknik. Hal ini mendukung efektivitas pendekatan visual dan praktik yang diterapkan dalam pelatihan. Siswa tidak hanya memahami konsep reaksi kimia yang terjadi, tetapi juga mampu menghubungkannya dengan isu global seperti krisis energi dan peluang energi terbarukan pada masa depan. Kolaborasi antara pihak industri dan pendidikan dalam konteks lokal juga mulai tumbuh, seperti inisiatif pelatihan teknologi *fuel cell* oleh Spectronik dan Toyota Indonesia Academy yang menasar peningkatan kapasitas tenaga terampil nasional di bidang energi bersih (Spectronik & Toyota Indonesia Academy, 2023).

Dari hasil observasi selama kegiatan, tim mencatat bahwa sebagian besar siswa menunjukkan antusiasme tinggi dan partisipasi aktif. Mereka terlihat mencatat penjelasan narasumber, berdiskusi dalam kelompok kecil, serta mengajukan pertanyaan selama sesi tanya jawab. Beberapa siswa secara spontan memfoto proses demonstrasi untuk dibagikan melalui media sosial, menunjukkan tingkat keterlibatan yang kuat terhadap materi.

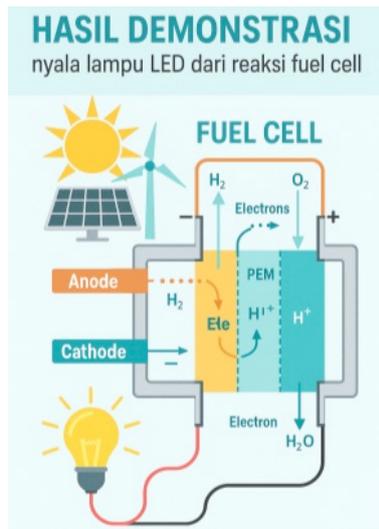
Visualisasi demonstrasi menjadi komponen penting dalam proses pembelajaran. Pemateri menggunakan *PEM fuel cell demonstrator* untuk memperlihatkan secara langsung bagaimana proses reaksi antara hidrogen dan oksigen menghasilkan listrik tanpa suara, asap, atau getaran. Proses ini ditunjukkan dengan nyala lampu LED sebagai indikator aliran listrik. Demonstrasi ini dilakukan oleh pemateri di depan kelas dengan bantuan tim, dan siswa diperkenankan mendekat untuk mengamati lebih detail. Tidak ada eksperimen mandiri oleh siswa karena keterbatasan waktu dan alat, tetapi mereka diajak berpartisipasi dalam menjawab pertanyaan pemateri seputar alat tersebut. Gambar 2 dan Gambar 3 menggambarkan suasana penyampaian materi dan prinsip kerja *fuel cell*, sedangkan Gambar 4 menunjukkan ilustrasi nyala lampu LED sebagai hasil demonstrasi.

Hasil wawancara semi-terstruktur dengan lima siswa terpilih mengungkapkan bahwa pelatihan ini memberikan pengalaman baru yang menyenangkan dan membuka perspektif tentang masa depan energi. Salah satu siswa menyatakan: "Saya baru tahu bahwa ada teknologi yang bisa menghasilkan listrik tanpa bahan bakar dan tanpa polusi. Saya jadi tertarik membuat produk yang ramah lingkungan." Siswa lain menyebutkan ketertarikannya untuk mengembangkan konsep bisnis sederhana berbasis *fuel cell*, seperti: "Bisa nggak kita bikin charger handphone portable dari fuel cell? Kayaknya menarik untuk dijual ke kalangan anak muda." Respons-respons ini menunjukkan bahwa pelatihan tidak hanya meningkatkan pemahaman teoretis, tetapi juga mendorong munculnya kesadaran *technopreneurship* di kalangan siswa.

Selain itu, pelatihan ini juga mendorong diskusi antarsiswa tentang potensi bisnis berbasis energi ramah lingkungan. Sebagian besar peserta yang diwawancarai menyatakan bahwa materi yang disampaikan lebih aplikatif dan inspiratif dibandingkan pelatihan sekolah yang pernah mereka ikuti. Hal ini sejalan dengan pendekatan *contextual teaching and learning* yang diterapkan dalam kegiatan ini.

Jika dibandingkan dengan kegiatan serupa di SMK lainnya, seperti pelatihan teknologi surya dan angin yang dilaporkan oleh Yuwono et al. (2020), pendekatan pelatihan ini memiliki keunggulan dalam aspek fokus tematik dan penggunaan teknologi demonstratif yang spesifik. Studi oleh Surya et al. (2020) di SMK Tasikmalaya, misalnya, hanya mengenalkan energi terbarukan secara umum tanpa menampilkan proses atau perangkat nyata. Oleh karena itu, kegiatan ini memberikan kontribusi berbeda dalam konteks pengenalan teknologi energi bersih yang bersifat aplikatif dan berbasis visual.

Secara keseluruhan, kegiatan ini menunjukkan bahwa pengenalan teknologi *fuel cell* melalui pengabdian masyarakat lintas disiplin mampu mendorong terbentuknya *technopreneurial awareness* di kalangan siswa vokasi. Pelatihan ini juga membuktikan bahwa transisi energi bersih tidak harus dimulai dari kalangan teknis semata, tetapi dapat melibatkan siswa dari latar belakang bisnis dan manajemen sebagai bagian dari ekosistem industri keberlanjutan. Secara umum, pencapaian dari kegiatan ini menguatkan urgensi pentingnya pendekatan pendidikan lintas disiplin berbasis ipteks terapan. Ketika teknologi diperkenalkan tidak hanya sebagai konsep fisika atau kimia, tetapi sebagai peluang sosial dan ekonomi, maka tingkat keterlibatan peserta meningkat. Hal ini mendukung literatur terdahulu yang menyatakan bahwa pembelajaran berbasis praktik (*experiential learning*) memiliki efektivitas tinggi dalam pembentukan pengetahuan baru, terutama bagi kelompok usia produktif di pendidikan vokasi (Kolb, 2015; Santosa & Wijaya, 2022).



Gambar 4. Ilustrasi hasil demonstrasi: nyala lampu LED dari reaksi *fuel cell*

### Simpulan

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat bertajuk *Pemberdayaan Generasi Muda dalam Transisi Energi Hijau melalui Pelatihan Teknologi Fuel Cell* berhasil memberikan kontribusi positif dalam peningkatan literasi teknologi energi bersih di kalangan siswa SMK jurusan Bisnis dan Manajemen. Hasil *pre-test* dan *post-test* menunjukkan adanya peningkatan signifikan dalam pemahaman peserta, yang mencerminkan efektivitas pendekatan pelatihan berbasis visual, interaktif, dan demonstratif. Meskipun berasal dari latar belakang non-teknik, peserta menunjukkan antusiasme tinggi dan keterlibatan aktif dalam proses pembelajaran.

Lebih dari sekadar memahami prinsip dasar kerja *fuel cell*, siswa juga mampu mengaitkan teknologi ini dengan isu-isu lingkungan dan peluang usaha. Beberapa peserta mengusulkan ide bisnis sederhana berbasis teknologi bersih, seperti charger portabel berbahan bakar hidrogen atau produk edukatif tentang energi ramah lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan pemahaman tidak berhenti pada aspek kognitif, tetapi meluas ke dimensi aplikatif dan kewirausahaan, yang relevan dengan latar belakang mereka sebagai siswa jurusan manajemen.

Kelebihan utama kegiatan ini terletak pada pendekatan kontekstual dan demonstratif yang terbukti efektif dalam menjembatani kesenjangan pemahaman teknologi di kalangan siswa non-teknik. Selain itu, hasil kegiatan menunjukkan potensi pengembangan kurikulum atau model pelatihan berbasis teknologi yang dapat diadaptasi oleh satuan pendidikan vokasi lainnya. Program sejenis dapat dirancang agar lebih inklusif dan lintas disiplin, sehingga siswa dari berbagai latar belakang ilmu juga dapat terlibat aktif dalam pembelajaran teknologi terapan yang relevan dengan kebutuhan masa depan.

Namun demikian, terdapat keterbatasan dalam hal durasi pelatihan yang hanya berlangsung satu jam. Waktu yang singkat ini belum sepenuhnya memungkinkan eksplorasi materi yang lebih dalam maupun praktik langsung oleh peserta. Keterbatasan ini dapat berdampak pada keberlanjutan pemahaman dalam jangka panjang. Oleh karena itu, disarankan adanya tindak lanjut dalam bentuk pelatihan lanjutan, program mentoring, atau pengembangan modul pembelajaran berbasis proyek yang memungkinkan peserta untuk mengembangkan prototipe sederhana dan mendalami aplikasi teknologi energi bersih secara lebih komprehensif.

Dengan demikian, kegiatan ini memberikan kontribusi nyata dalam memperkuat pendidikan lintas disiplin berbasis *ipteks* terapan yang tidak hanya meningkatkan pemahaman siswa terhadap teknologi bersih, tetapi juga menumbuhkan kesadaran berwirausaha berkelanjutan sebagai bagian dari kesiapan menghadapi tantangan transisi energi global.

### Saran

Berdasarkan hasil dan proses pelaksanaan kegiatan, disarankan agar program pengabdian seperti ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk menutupi kekurangan yang ditemukan. Salah satunya adalah memperpanjang durasi pelatihan agar materi dapat disampaikan lebih mendalam dan disertai praktik langsung yang lebih variatif. Selain itu, perlu dirancang kegiatan lanjutan berupa mentoring atau workshop berkelanjutan yang melibatkan siswa secara aktif dalam pembuatan prototipe sederhana berbasis *fuel cell*. Pengembangan modul pembelajaran sederhana yang dapat digunakan dalam kegiatan ekstrakurikuler juga direkomendasikan untuk memperkuat transfer pengetahuan. Kolaborasi yang lebih luas dengan pihak industri, pemerintah daerah, serta lembaga energi terbarukan sangat dianjurkan untuk mendukung aspek implementatif teknologi dan memperluas jangkauan dampak kegiatan. Dengan demikian, keberlanjutan dan efektivitas program PkM ini dapat ditingkatkan dalam rangka membentuk generasi muda yang sadar lingkungan, inovatif, dan berdaya saing tinggi dalam bidang energi bersih.

### Daftar Pustaka

- Barbir, F. (2020). *PEM fuel cells: Theory and practice (3rd ed.)*. Academic Press.
- Creutzig, F., Agoston, P., Goldschmidt, J. C., Jacob, D., Krey, V., Lohrey, S., ... & Edenhofer, O. (2015). Integrating renewables into energy systems: A review of energy pathways, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 762–779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.010>
- Dincer, I., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.035>
- Fitriani, E., Supriyanto, A., & Widodo, S. (2021). Pengembangan kompetensi siswa melalui project based learning berbasis green technology. *Jurnal Pendidikan Vokasi*, 11(1), 41–49.
- Gota, S., Huizenga, C., Peet, K., Medimorec, N., & Bakker, S. (2019). Decarbonising transport to achieve Paris Agreement targets. *Energy Efficiency*, 12(2), 363–386.
- Hidayat, T., Nursyam, H., & Ramadhan, R. (2019). Literasi energi baru terbarukan di kalangan siswa SMK. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin*, 19(2), 112–119.
- Hikmawati, D., Surya, H., & Mustofa, A. (2020). Implementasi pelatihan energi terbarukan untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan siswa. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(3), 222–230.
- Jalil, N. F. A., Hasran, U. A., Mat Noor, S. F., & Norman, M. H. (2024). Design and development of fuel cell learning through digital game-based learning to raise awareness of low carbon emissions. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 13(3), 49–56.
- Kolb, D. A. (2015). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development (2nd ed.)*. New Jersey: Pearson Education.
- Marais, E. A., Silvern, R. F., Vodonos, A., Dupin, E., Bockarie, A. S., Mickley, L. J., & Schwartz, J. (2019). Air quality and health impact of future fossil fuel use for electricity generation and transport in Africa. *Environmental science & technology*, 53(22), 13524–13534.
- Mustadi, A., & Nurohman, M. (2017). Pengembangan model contextual teaching and learning pada pembelajaran IPS untuk meningkatkan karakter siswa. *Jurnal Pendidikan Karakter*, 7(1), 1–13.
- Nguyen, T. V., & Ward, K. (2018). Fuel cells. In M. D. Lechner (Ed.), *Green energy: Basic concepts and fundamentals* (pp. 45–70). Springer.
- Putri, R. D., & Suprpto, E. (2022). Kesiapan guru dalam implementasi kurikulum energi terbarukan di SMK. *Jurnal Teknologi Pendidikan*, 24(2), 109–120.
- Rayment, C., & Sherwin, S. (2019). Introduction to fuel cell technology. *Journal of Renewable Energy Research*, 9(1), 34–41.
- Raza, M. Q., Rehan, M., & Khan, M. T. (2021). Role of hydrogen fuel cells in future energy systems. *Energy Reports*, 7, 8424–8435. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.045>
- Rohman, A., & Wulandari, T. (2021). Efektivitas pelatihan teknologi energi bersih berbasis praktik lapangan. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 7(1), 45–53.

- Santosa, B., & Wijaya, H. (2022). Efektivitas pendekatan experiential learning dalam meningkatkan kompetensi peserta didik SMK. *Jurnal Pendidikan Vokasi*, 12(2), 115–124.
- Sanjaya, W., & Fitriyah, L. (2022). Strategi pembelajaran berbasis contextual teaching and learning dalam pendidikan vokasi. *Jurnal Pendidikan Vokasional*, 12(2), 55–63.
- Sari, A. D., Mulyani, E., & Rachmat, M. (2023). Model pelatihan energi terbarukan untuk peningkatan literasi siswa. *Jurnal Pendidikan Teknik*, 10(1), 18–27.
- Setiawan, M. R., & Hartati, S. (2019). Dampak gas karbon monoksida terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 11(1), 15–21.
- Sudirjo, T., Arifin, R., & Wibowo, S. (2023). Tantangan implementasi kurikulum energi terbarukan di SMK. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 25(1), 67–75.
- Surya, D., Prasetyo, A., & Hidayat, T. (2020). Pelatihan energi terbarukan berbasis panel surya bagi siswa SMK: Studi kasus di SMK Negeri 1 Tasikmalaya. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Teknik*, 4(2), 50–56.
- Suyanto, S. (2020). Penerapan pendekatan contextual teaching and learning dalam pembelajaran SMK untuk peningkatan keterampilan abad 21. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 22(3), 201–209.
- Spectronik & Toyota Indonesia Academy. (2023). Memorandum of Understanding on Hydrogen Fuel Cell Education and Training.
- Utami, D., Kurniawan, R., & Farida, A. (2023). Edukasi transisi energi melalui pelatihan siswa SMK di daerah urban. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 14(2), 89–97.
- Yuwono, H., Sulastri, S., & Rachmawati, T. (2020). Implementasi pembelajaran energi surya di SMK: Studi kasus. *Jurnal Inovasi Teknologi Pendidikan*, 7(1), 65–73.
- Zhang, Y., Cai, T., & Liu, H. (2018). Air pollution and health effects in China: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 626, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.048>
- Zhou, Y., Xie, M., & Li, J. (2019). Development of PEMFC for vehicle application: Current status and future challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15160–15177.