

Pengkomputeran Hijau dalam Pendidikan: Mengurangkan Penggunaan Tenaga dalam Pembelajaran Digital

Nur Elyani binti Mohammad¹, Ainun Rafieza binti Ahmad Tajuddin¹, Nur Nadia binti Musa^{1,*}

¹Unit Teknologi Maklumat, Kolej Komuniti Arau, Perlis, Malaysia

Email: ¹nurelyani@staf.kkarau.edu.my, ²ainunrafieza@staf.kkarau.edu.my, ³nadiamusa@staf.kkarau.edu.my

Email Penulis Korespondensi: nadiamusa@staf.kkarau.edu.my

Abstrak—Pengkomputeran hijau semakin mendapat perhatian sebagai satu pendekatan penting dalam menangani isu peningkatan penggunaan tenaga akibat transformasi digital dalam sektor pendidikan tinggi. Kajian ini bertujuan untuk meneroka corak penggunaan tenaga semasa, menjangka potensi penjimatan tenaga hasil pelaksanaan strategi pengkomputeran hijau, serta menilai tahap kesedaran dan amalan lestari dalam kalangan pelajar dan pensyarah di Kolej Komuniti Arau. Reka bentuk kuantitatif kuasi-eksperimen akan digunakan, dengan pengumpulan data melalui alat pengukur tenaga dan soal selidik berstruktur. Antara strategi yang akan digunakan adalah penetapan pengurusan kuasa dan penjadualan penutupan automatik bagi peranti ICT. Data yang diperoleh akan dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan inferensi seperti ujian t-berpasangan dan ujian Wilcoxon Signed-Rank bagi mengenal pasti perbezaan ketara sebelum dan selepas intervensi. Kajian ini dijangka dapat menunjukkan penurunan penggunaan tenaga sebanyak 10–20%, di samping mengesan peningkatan kesedaran dan perubahan positif dalam tingkah laku penjimatan tenaga dalam kalangan responden. Hasil jangkaan ini berpotensi menyumbang kepada pembangunan kerangka konseptual teknologi lestari dalam pendidikan serta menyediakan asas kukuh bagi pelaksanaan dasar institusi berkaitan penggunaan tenaga. Selain itu, kajian ini dijangka dapat menyokong pencapaian Matlamat Pembangunan Lestari (*Sustainable Development Goals*-SDG) yang meliputi SDG 4, SDG 7 dan SDG 13), sekali gus menggalakkan transformasi digital yang lebih mampan di institusi TVET.

Kata Kunci: Pengkomputeran Hijau; Pembelajaran Digital; Penjimatan Tenaga; Pendidikan Mampan; SDG Malaysia.

1. PENDAHULUAN

Sektor pendidikan berada di barisan hadapan dalam penggunaan teknologi digital dalam Revolusi Industri 4.0. Penggunaan bilik darjah maya, sistem pengurusan pembelajaran (LMS), dan pelbagai aplikasi pintar telah mengubah cara pembelajaran dilaksanakan. Lonjakan ini selaras dengan tuntutan pembelajaran sepanjang hayat dan pendidikan fleksibel, sejajar dengan transformasi digital global (Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024). Malaysia turut menyahut seruan ini dengan memperkenalkan pelbagai dasar pendidikan digital yang bertujuan untuk membantu pelajar dan guru mempunyai kemahiran digital yang lebih baik. Walau bagaimanapun, di sebalik manfaat digitalisasi, timbul cabaran berkaitan kelestarian, khususnya melibatkan penggunaan tenaga dan jejak karbon digital yang semakin meningkat. Penggunaan peranti, pelayan (*servers*), dan sambungan rangkaian berterusan telah membawa kepada penggunaan elektrik yang tinggi dalam persekitaran institusi pendidikan (Racsco & Troll, 2020). Ini menimbulkan keperluan mendesak untuk menilai semula amalan teknologi yang digunakan untuk menjadikannya lebih lestari dan mesra alam.

Pengkomputeran hijau adalah pendekatan proaktif yang menekankan penggunaan teknologi maklumat secara cekap, mampan dan bertanggungjawab terhadap alam sekitar. Ia melibatkan amalan seperti penjimatan kuasa, virtualisasi sumber, pengoptimuman perkakasan dan pengurangan pembaziran digital (Podder & Samanta, 2022). Jika konsep ini digunakan dalam sistem pendidikan, ia sangat mampu membantu menjimatkan wang dan meningkatkan kesedaran alam sekitar pelajar. Akhir-akhir ini, penyelidik dan pembuat dasar semakin tertarik untuk memasukkan prinsip kelestarian ke dalam pendidikan digital. Menurut Peters et al. (2023), pendidikan moden perlu menyepadukan elemen tanggungjawab alam sekitar dalam kurikulum ICT bagi membentuk generasi pengguna teknologi yang lebih beretika. Oleh itu, pengkomputeran hijau bukan sahaja satu kemajuan teknologi, tetapi juga satu pendekatan pedagogi baharu yang memerlukan warga pendidikan mengubah sikap dan tingkah laku digital.

Dalam konteks ini, kajian mengenai pengkomputeran hijau dalam pendidikan bukan sahaja relevan, tetapi juga penting untuk memastikan kemampanan pembangunan pendidikan digital negara. Selaras dengan Matlamat Pembangunan Lestari (SDG 4, SDG 7 dan SDG 13), penerokaan terhadap strategi pengkomputeran hijau yang sesuai dengan konteks institusi tempatan amat diperlukan untuk menyokong agenda nasional ke arah transformasi pendidikan yang berimpak, cekap tenaga dan lestari (Akay, 2023).

Perkembangan teknologi digital dalam pendidikan seperti penggunaan bilik darjah maya dan sistem e-pembelajaran telah membawa kepada peningkatan penggunaan tenaga, terutamanya disebabkan oleh penggunaan peranti dan infrastruktur IT yang beroperasi secara berterusan (Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024). Walaupun pendekatan ini menyokong pembelajaran fleksibel dan digitalisasi pendidikan, ia juga menyumbang kepada jejak karbon digital yang semakin membesar dalam institusi pendidikan (Racsco & Troll, 2020). Namun begitu, amalan pengkomputeran hijau dalam sektor pendidikan masih belum meluas dan kurang diterokai secara menyeluruh. Sebahagian besar institusi belum mempunyai strategi yang jelas untuk mengurangkan penggunaan tenaga atau meningkatkan kecekapan teknologi yang digunakan (Peters et al., 2023). Tambahan pula, tahap kesedaran dalam kalangan warga institusi terhadap teknologi mampan masih rendah, dan pelaksanaan dasar mesra alam sering tidak disokong oleh data atau panduan pelaksanaan yang berstruktur (Akay, 2023).

Menurut Podder dan Samanta (2022), kekurangan amalan standard dalam kalangan pengguna teknologi di institusi pendidikan menyukarkan usaha mengurangkan jejak karbon digital secara konsisten. Justeru, terdapat keperluan segera

untuk meneroka pendekatan pengkomputeran hijau yang praktikal dan bersesuaian dengan konteks tempatan, bagi memastikan transformasi pendidikan digital yang bukan sahaja canggih, tetapi juga cekap tenaga, beretika dan mampan selaras dengan Matlamat Pembangunan Lestari (SDG 4, SDG 7 dan SDG 13).

Mengenalpasti corak penggunaan tenaga semasa dalam makmal komputer dan platform pembelajaran dalam talian di Kolej Komuniti Arau menggunakan alat pengukur tenaga mudah alih (*plug-in power meters*) dan juga perisian pemantauan tenaga sedia ada. Mengukur peratusan tenaga yang dijimatkan (sasaran: 10–20%) dalam tempoh empat (4) minggu selepas pelaksanaan sekurang-kurangnya dua (2) strategi pengkomputeran hijau melalui penetapan pengurusan kuasa dan penutupan jadual. Menilai tahap kesedaran dan amalan penjimatan tenaga dalam persekitaran pembelajaran digital.

Dalam tempoh lima (5) tahun kebelakangan ini, tumpuan penyelidikan terhadap hubungan antara pengkomputeran hijau dan bidang pendidikan semakin berkembang pesat, selaras dengan peningkatan penggunaan teknologi digital dalam sistem pengajaran dan pembelajaran. Perkembangan ini didorong oleh keperluan mendesak untuk mengimbangi kemajuan digital dengan keprihatinan terhadap kelestarian alam sekitar. Pelbagai kajian telah memfokuskan kepada peranan institusi pendidikan dalam melaksanakan teknologi maklumat dan komunikasi (ICT) secara mampan, termasuk melalui pelaksanaan dasar tenaga rendah, penggunaan peralatan berkecekapan tinggi, serta pengurusan sisa elektronik secara bertanggungjawab (Peters et al., 2023; Peters et al., 2023; Akay, 2023). Antara tema utama yang dikenal pasti dalam literatur termasuklah integrasi amalan teknologi maklumat (IT) hijau dalam pentadbiran institusi, peranan alat digital dalam menyemai kesedaran terhadap alam sekitar dalam kalangan pelajar dan pensyarah, serta cabaran struktur dan teknikal dalam melaksanakan transformasi hijau di peringkat institusi pendidikan (Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024; Peters et al., 2023). Kajian oleh Podder dan Samanta (2022) misalnya menunjukkan bahawa strategi ICT hijau seperti pengaktifan mod jimat tenaga dan pelayan maya dapat mengurangkan penggunaan elektrik dengan ketara dan pada masa sama meningkatkan keberkesanan pedagogi. Manakala Racsko dan Troll (2020) pula menegaskan pentingnya pendidikan awal tentang kecekapan IT sebagai asas kepada pembentukan sikap digital lestari dalam kalangan generasi muda.

Walaupun dapatan tersebut memperlihatkan potensi besar pengkomputeran hijau dalam sektor pendidikan, masih wujud beberapa percanggahan dan kekangan dalam pelaksanaannya. Sebahagian besar kajian menyokong integrasi teknologi lestari secara menyeluruh, namun terdapat kritikan bahawa pelaksanaannya masih terhalang oleh ketiadaan metrik standard untuk mengukur keberkesannya secara objektif (Akay, 2023). Hal ini turut dibangkitkan oleh Urban et al. (2024), yang melihat jurang besar antara matlamat teori kelestarian digital dan realiti praktikal pelaksanaannya dalam sistem pendidikan yang bersifat konvensional. Tambahan pula, menurut Peters et al. (2023), banyak institusi masih kekurangan rangka kerja yang kukuh untuk menilai secara konsisten impak amalan IT hijau yang dilaksanakan. Sehubungan itu, beberapa jurang penyelidikan telah dikenalpasti yang memerlukan perhatian lanjut. Antaranya ialah kekurangan kajian empirikal yang secara kuantitatif mengukur tahap penjimatan tenaga hasil daripada pelaksanaan strategi pengkomputeran hijau dalam makmal komputer atau platform e-pembelajaran. Selain itu, kajian terdahulu juga kurang meneliti aspek tingkah laku pengguna seperti kesedaran, motivasi dan halangan dalam mengamalkan teknologi mampan (Peters et al., 2023; Akay, 2023; Racsko & Troll, 2020).

Oleh itu, kajian yang dicadangkan ini akan memfokuskan kepada tiga (3) elemen utama: corak penggunaan tenaga semasa, keberkesanan intervensi pengkomputeran hijau, serta tahap kesedaran dan penerimaan warga institusi terhadap amalan ICT hijau. Dengan menyediakan bukti empirikal dan cadangan praktikal berdasarkan data tempatan, kajian ini berpotensi menyumbang kepada pembangunan garis panduan lestari yang boleh digunapakai oleh institusi pendidikan secara meluas, serta menyokong agenda kelestarian digital negara.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Justifikasi Reka Bentuk Kajian

Kajian ini menggunakan pendekatan reka bentuk kajian kuantitatif kerana ia membolehkan data dikumpul dan dianalisis secara objektif serta boleh diukur, sejajar dengan keperluan untuk menilai corak penggunaan tenaga dan tahap keberkesanan strategi pengkomputeran hijau dalam konteks persekitaran pendidikan. Pendekatan ini dipilih kerana ia menyediakan asas yang kukuh untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat antara pelaksanaan intervensi dengan perubahan tingkah laku atau penggunaan sumber, khususnya dari segi impak terhadap penjimatan tenaga. Untuk mencapai tujuan tersebut, reka bentuk kajian kuasi-eksperimen akan digunakan, iaitu satu reka bentuk yang membolehkan perbandingan dibuat antara dua situasi iaitu sebelum dan selepas pelaksanaan intervensi tertentu tanpa melibatkan pemilihan rawak sepenuhnya terhadap kumpulan kajian.

Dalam kajian ini, intervensi yang akan diperkenalkan melibatkan pelaksanaan beberapa strategi pengkomputeran hijau seperti penyesuaian tetapan pengurusan kuasa pada komputer, pengaktifan fungsi penutupan automatik selepas tempoh tidak aktif, serta pelabelan kesedaran tenaga di makmal komputer. Reka bentuk ini membolehkan pengukuran perubahan dilakukan ke atas penggunaan tenaga secara langsung melalui instrumen pemantauan khas. Hasil pengumpulan data sebelum dan selepas intervensi kemudiannya akan dianalisis menggunakan kaedah statistik untuk menentukan sama ada terdapat perubahan signifikan dalam penggunaan tenaga serta sejauh mana strategi yang diperkenalkan memberikan impak positif. Tambahan pula, pendekatan ini juga selaras dengan matlamat kajian yang bukan sahaja ingin menilai tahap

kecekapan tenaga yang dicapai, tetapi turut mengukur tahap kesedaran dan penerimaan pihak berkepentingan iaitu pelajar dan pensyarah terhadap amalan pengkomputeran hijau dalam persekitaran digital.

2.2 Populasi dan Strategi Persampelan

Populasi sasaran bagi kajian ini terdiri daripada pelajar dan pensyarah Kolej Komuniti Arau yang terlibat secara aktif dalam penggunaan makmal komputer serta platform pembelajaran digital seperti sistem pengurusan pembelajaran (LMS), perisian e-pembelajaran, dan alat kolaboratif atas talian. Populasi ini dipilih kerana mereka merupakan pengguna utama infrastruktur teknologi institusi dan berpotensi menyumbang kepada corak penggunaan tenaga digital yang signifikan. Justeru, pemahaman terhadap kesedaran serta amalan mereka dalam konteks pengkomputeran hijau adalah amat penting bagi menilai keberkesanan intervensi yang dirancang. Dalam pemilihan sampel, kajian ini akan menggunakan strategi persampelan bertujuan (*purposive sampling*), iaitu satu kaedah yang membolehkan penyelidik memilih peserta berdasarkan kriteria tertentu yang relevan dengan objektif kajian.

Melalui pendekatan ini, seramai 30 orang pelajar akan dipilih, terdiri daripada mereka yang kerap menggunakan makmal komputer atau mengikuti kelas dalam talian secara konsisten. Pemilihan ini bertujuan mendapatkan respon daripada pelajar yang benar-benar terdedah kepada penggunaan teknologi secara intensif dalam rutin pembelajaran mereka. Di samping itu, seramai 10 orang pensyarah juga akan dipilih sebagai responden, terdiri daripada individu yang aktif menggunakan alat e-pembelajaran seperti sistem LMS, perisian interaktif atau terlibat secara langsung dalam pengurusan sumber ICT institusi. Ini termasuk pensyarah yang memainkan peranan dalam penyelenggaraan makmal, pembangunan kandungan digital, atau membimbing projek yang memerlukan penggunaan teknologi secara berterusan. Bagi tujuan pelaksanaan intervensi dan pemantauan penggunaan tenaga, dua (2) makmal komputer akan dipilih secara strategik berdasarkan tahap penggunaan harian yang tinggi, ketersediaan infrastruktur pemantauan tenaga, dan kesesuaian ruang untuk pelaksanaan intervensi seperti tetapan penjimatan kuasa dan pemantauan pemerhatian langsung. Pemilihan makmal ini bertujuan memastikan keberkesanan pelaksanaan intervensi dapat diperhatikan secara jelas dan berkesan dalam tempoh kajian.

2.3 Kaedah dan Instrumen Pengumpulan Data

2.3.1 Data Penggunaan Tenaga

Bagi memenuhi objektif 1.2.1 dan 1.2.2, pengumpulan data penggunaan tenaga akan dilaksanakan secara sistematik melalui dua (2) kaedah utama. Pertama, penggunaan alat pengukur tenaga mudah alih (*plug-in power meters*) akan membolehkan penyelidik merekodkan penggunaan elektrik secara langsung pada peranti komputer, pencetak, dan perkakasan lain di makmal. Kedua, perisian pemantauan tenaga sedia ada yang telah dipasang pada komputer dan pelayan (*server*) akan digunakan untuk mendapatkan bacaan penggunaan tenaga secara automatik dan berterusan dalam bentuk digital.

Kaedah ini membolehkan pencatatan data secara longitudinal dan berintegrasi merentasi pelbagai peranti. Pengumpulan data akan dijalankan dalam dua (2) fasa utama: (i) pra-intervensi, selama empat (4) minggu sebelum pelaksanaan strategi pengkomputeran hijau, dan (ii) pasca-intervensi, selama empat (4) minggu selepas dua (2) strategi dilaksanakan iaitu penetapan pengurusan kuasa (*power management settings*) dan penjadualan penutupan automatik peranti. Data daripada kedua-dua fasa ini akan dibandingkan untuk mengukur peratusan penjimatan tenaga, dengan sasaran pengurangan antara 10–20%. Prosedur ini juga menyokong penilaian terhadap keberkesanan strategi yang diaplikasikan di peringkat institusi pendidikan vokasional.

2.3.2 Soal Selidik

Selaras dengan objektif 1.2.3 dan 1.2.4, instrumen soal selidik berstruktur akan digunakan bagi menilai tahap kesedaran, sikap dan amalan penjimatan tenaga dalam kalangan pelajar dan pensyarah Kolej Komuniti Arau. Soal selidik ini juga direka bentuk untuk mengenal pasti potensi amalan IT mampan yang boleh dicadangkan bagi pelaksanaan institusi. Soal selidik akan diedarkan kepada responden yang aktif menggunakan makmal komputer dan platform pembelajaran digital. Soal selidik ini mengandungi tiga (3) dimensi utama:

- a. Kesedaran terhadap konsep dan kepentingan pengkomputeran hijau, termasuk kefahaman tentang impak alam sekitar hasil penggunaan teknologi secara berlebihan.
- b. Tingkah laku penjimatan tenaga, contohnya amalan mematikan peranti selepas digunakan, menggunakan mod jimat tenaga, dan menyokong automasi kuasa.
- c. Sikap dan sokongan terhadap inisiatif lestari, seperti kesediaan melibatkan diri dalam perubahan tingkah laku digital dan menyokong dasar teknologi hijau di institusi.

Instrumen ini akan diadaptasi daripada soal selidik tingkah laku ICT hijau yang telah disahkan dalam kajian terdahulu (Racsko & Troll, 2020), serta disesuaikan dengan konteks pendidikan teknikal tempatan. Proses adaptasi melibatkan pemurnian bahasa, kandungan dan skala supaya bersesuaian dengan latar belakang responden. Skala Likert lima mata (1 = Sangat Tidak Setuju hingga 5 = Sangat Setuju) akan digunakan untuk menilai intensiti respons. Soal selidik ini dijangka mengambil masa antara 8–10 minit untuk dilengkapkan dan akan diedarkan secara atas talian menggunakan Google Form.

2.4 Prosedur Analisis Data

Bagi memastikan keselarasan dengan objektif kajian yang telah ditetapkan, pelbagai kaedah analisis data akan dilaksanakan secara sistematik. Pertama sekali, analisis statistik deskriptif akan digunakan bagi mencapai objektif 1.2.1 dan 1.2.3. Statistik seperti nilai min, peratusan dan sisihan piawai akan digunakan untuk menggambarkan corak penggunaan tenaga elektrik sedia ada di makmal komputer dan platform pembelajaran dalam talian, serta mengenal pasti tahap kesedaran dan amalan penjimatan tenaga dalam kalangan pelajar dan pensyarah. Data ini diperoleh melalui rekod alat pengukur tenaga mudah alih (*plug-in power meters*), perisian pemantauan sedia ada, serta soal selidik. Seterusnya, bagi menjawab objektif 1.2.2 yang menumpukan kepada keberkesanan pelaksanaan intervensi pengkomputeran hijau, analisis inferensi akan digunakan untuk membandingkan data sebelum dan selepas intervensi. Dalam hal ini, ujian *t*-berpasangan (*paired sample t-test*) akan digunakan sekiranya data memenuhi syarat taburan normal (mengikut ujian normaliti Kolmogorov-Smirnov atau Shapiro-Wilk).

Jika sebaliknya, Ujian Wilcoxon Signed-Rank, iaitu kaedah bukan parametrik, akan diaplikasikan. Analisis ini bertujuan mengukur peratusan penjimatan tenaga, sama ada mencapai sasaran 10–20% seperti yang disasarkan dalam objektif. Akhir sekali, bagi menyokong pencapaian objektif 1.2.3 dan memperkukuh kefahaman terhadap kaitan antara kesedaran dan tingkah laku pengguna, analisis korelasi Pearson akan dijalankan. Ini akan mengenal pasti hubungan antara tahap kesedaran peserta mengenai pengkomputeran hijau dan kekerapan mereka mengamalkan penjimatan tenaga dalam konteks pembelajaran digital. Hasil daripada analisis ini boleh menyumbang kepada cadangan praktikal bagi pelaksanaan strategi pendidikan yang lebih lestari.

2.5 Langkah Kesahan dan Kebolehpercayaan

Bagi memastikan kualiti dan ketepatan instrumen kajian yang digunakan, langkah awal yang akan diambil adalah penilaian terhadap kesahan kandungan (*content validity*) instrumen tersebut. Proses ini akan dilaksanakan melalui semakan dan penilaian mendalam oleh panel pakar yang terdiri daripada pensyarah berpengalaman dalam bidang teknologi maklumat serta penyelidik yang mengkhusus dalam isu kelestarian dan pengkomputeran hijau. Panel pakar ini akan menilai sejauh mana item-item dalam soal selidik mencerminkan konstruk yang ingin diukur, serta memberi cadangan terhadap penggubalan semula atau penambahbaikan item yang dianggap kurang jelas, tidak relevan, atau berisiko menimbulkan kekeliruan kepada responden.

Seterusnya, bagi menilai kebolehpercayaan (*reliability*) instrumen, analisis statistik akan dijalankan menggunakan pekali Alpha Cronbach. Nilai ambang minimum yang diterima pakai dalam kajian ini ialah 0.70, yang menunjukkan tahap konsistensi dalaman item yang memadai untuk tujuan kajian sosial. Pekali ini akan menunjukkan sama ada item-item dalam setiap bahagian soal selidik mengukur konstruk yang sama secara seragam atau sebaliknya. Di samping itu, satu ujian rintis (*pilot test*) akan dilaksanakan ke atas sekumpulan kecil responden yang terdiri daripada lima (5) orang pelajar dan dua (2) orang pensyarah. Tujuan utama ujian rintis ini adalah untuk menilai kefahaman, kejelasan bahasa, kesesuaian konteks, serta kebolehpakaian setiap item soal selidik. Maklum balas yang diperoleh daripada peserta ujian rintis akan dianalisis dan digunakan untuk membuat pelarasan akhir terhadap instrumen sebelum digunakan secara rasmi dalam fasa pengumpulan data utama. Pendekatan ini diambil bagi memastikan setiap soalan dalam soal selidik adalah jelas, relevan dan mampu memberikan data yang sahih serta boleh dipercayai.

2.6 Pertimbangan Etika

Sebagai langkah awal sebelum pengumpulan data dijalankan, persetujuan dimaklumkan (*informed consent*) akan diperoleh daripada semua peserta kajian melalui borang persetujuan bertulis yang menerangkan dengan jelas objektif kajian, prosedur penglibatan, hak peserta serta jaminan kerahsiaan. Dalam borang tersebut, akan dinyatakan bahawa penglibatan mereka adalah atas dasar sukarela sepenuhnya, tanpa sebarang paksaan atau tekanan daripada mana-mana pihak. Identiti peserta akan dilindungi sepenuhnya melalui kaedah seperti penggunaan kod responden dan penyimpanan data dalam persekitaran yang selamat dan terkawal. Tiada maklumat peribadi akan didedahkan dalam sebarang penerbitan hasil kajian.

Seterusnya, peserta juga akan dimaklumkan bahawa mereka mempunyai hak untuk menarik diri daripada kajian pada bila-bila masa, tanpa perlu memberikan sebarang alasan, dan penarikan diri tersebut tidak akan mengakibatkan sebarang penalti mahupun menjejaskan kedudukan mereka sebagai pelajar atau staf institusi. Ini bertujuan memastikan bahawa autonomi dan kebebasan individu sentiasa dihormati sepanjang proses kajian berlangsung. Selaras dengan amalan penyelidikan beretika, kajian ini akan mematuhi semua peruntukan yang ditetapkan dalam Polisi Etika Penyelidikan Kolej Komuniti Arau, termasuk keperluan terhadap ketelusan, keadilan, dan tanggungjawab penyelidik terhadap kesejahteraan peserta. Selain itu, sebelum sebarang aktiviti lapangan dijalankan, permohonan kelulusan etika akan dikemukakan kepada Lembaga Etika Penyelidikan institusi, dan hanya setelah kelulusan rasmi diberikan barulah aktiviti pengumpulan data akan dilaksanakan. Ini bagi memastikan keseluruhan kajian dijalankan dengan integriti dan mematuhi garis panduan etika penyelidikan yang diiktiraf.

2.7 Keterbatasan Kajian

Kajian ini dilaksanakan dalam skala terhad, iaitu melibatkan hanya satu institusi pendidikan tinggi. Oleh itu, kebolehgunaan (*usability*) dan kebolehlaksanaan umum (*generalizability*) hasil kajian ini berkemungkinan terhad kepada konteks institusi tersebut sahaja dan tidak boleh mewakili keseluruhan populasi institusi pendidikan lain yang mempunyai

struktur, dasar, dan tahap kemudahan yang berbeza. Tambahan pula, tempoh pemantauan tenaga yang dilaksanakan dalam kajian ini adalah agak singkat, iaitu selama empat (4) minggu bagi fasa pra-intervensi dan empat (4) minggu lagi bagi fasa pasca-intervensi. Walaupun tempoh ini mencukupi untuk mengesan perubahan awal penggunaan tenaga, namun ia mungkin tidak cukup untuk mencerminkan corak penggunaan tenaga yang lebih konsisten dalam jangka masa panjang, khususnya apabila melibatkan perubahan tingkah laku pengguna atau faktor bermusim.

Selain itu, pengumpulan data melalui soal selidik yang dilaporkan sendiri oleh responden (*self-reported data*) berpotensi menimbulkan bias, seperti bias keinginan sosial (*social desirability bias*), di mana responden mungkin memberikan jawapan yang dilihat lebih baik secara sosial walaupun tidak sepenuhnya mencerminkan tingkah laku sebenar. Walaupun kerahsiaan dan anonimiti responden dijamin sepanjang kajian bagi mengurangkan kesan bias ini, keterbatasan tetap wujud dalam menjamin ketulenan setiap maklum balas. Akhir sekali, aspek teknikal berkaitan pengumpulan data tenaga turut menjadi cabaran, khususnya dari segi akses kepada peralatan pemantauan tenaga yang tepat, moden dan bersepadu. Dalam sesetengah keadaan, pemantauan bergantung kepada peralatan sedia ada institusi yang mungkin tidak seragam dari segi ketepatan bacaan, kepekaan sensor, atau kemampuan log data secara automatik. Faktor ini secara langsung boleh mempengaruhi ketepatan dan kebolehpercayaan data kuantitatif yang dikumpul, sekali gus memberi kesan kepada kekuatan dapatan kajian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sumbangan Akademik / Teori

Kajian ini dijangka menyumbang secara signifikan kepada pengembangan ilmu dalam bidang akademik berkaitan pengkomputeran lestari, khususnya dalam konteks pendidikan tinggi. Hal demikian ini adalah kerana bidang ini masih dalam peringkat perkembangan, dan memerlukan lebih banyak kajian empirikal yang meneliti secara khusus strategi penjimatan tenaga yang sesuai untuk diaplikasikan dalam persekitaran institusi pendidikan. Sehubungan itu, kajian ini dibina berasaskan literatur terkini yang menggariskan keperluan mendesak terhadap penyelidikan yang menyediakan bukti empirikal berkaitan pendekatan teknologi lestari yang praktikal dan bersesuaian dengan keperluan institusi akademik (Peters et al., 2023). Tambahan pula, kajian ini turut menggabungkan kedua-dua dimensi utama dalam bidang pengkomputeran hijau, iaitu dimensi teknikal dan dimensi tingkah laku pengguna.

Pendekatan ini bukan sahaja membolehkan penilaian terhadap keberkesanan intervensi teknologi seperti konfigurasi penjimatan tenaga, malah turut menilai tahap kesedaran dan penerimaan pengguna terhadap amalan kelestarian digital. Oleh itu, kajian ini memperkenalkan satu kerangka konseptual yang bersifat baharu dan menyeluruh, yang menghubungkan secara langsung antara aspek pengoptimuman infrastruktur ICT dengan amalan kelestarian yang digerakkan oleh tingkah laku pengguna itu sendiri (Urban et al., 2024). Selain itu, penggunaan reka bentuk kuasi-eksperimen yang digabungkan dengan analisis kesedaran melalui soal selidik berstruktur membolehkan pengumpulan data kuantitatif yang kukuh, sekaligus memberikan gambaran holistik terhadap keberkesanan pendekatan yang dilaksanakan. Oleh sebab itu, model kajian ini bukan sahaja relevan untuk digunakan dalam konteks tempatan, malah berpotensi untuk diadaptasi atau ditiru oleh penyelidik masa hadapan bagi tujuan kajian perbandingan di pelbagai jenis institusi pendidikan yang lain, sama ada di peringkat kebangsaan mahupun antarabangsa.

3.2 Aplikasi Praktikal

Hasil kajian ini dijangka dapat menawarkan strategi tindakan yang bersifat praktikal dan boleh dilaksanakan oleh institusi pendidikan dalam usaha mengurangkan penggunaan tenaga secara sistematik tanpa menjejaskan kelancaran proses pengajaran dan pembelajaran. Melalui pelaksanaan strategi ini, institusi bukan sahaja dapat menjimatkan kos operasi, malah turut menunjukkan komitmen terhadap prinsip kelestarian alam sekitar dalam persekitaran digital. Selanjutnya, data empirikal yang diperoleh daripada kajian ini akan menyokong pelaksanaan pelbagai penyelesaian kos efektif antaranya termasuklah penyesuaian tetapan penjimatan tenaga pada peranti ICT, penjadualan penggunaan makmal komputer secara lebih efisien, serta pelaksanaan protokol penutupan automatik yang dapat mengurangkan pembaziran tenaga luar waktu operasi (Podder & Samanta, 2022).

Pelaksanaan langkah-langkah ini boleh dijadikan panduan operasional bagi pihak pengurusan ICT dalam merangka dasar penggunaan tenaga yang lebih mampan. Di samping itu, dapatan kajian ini juga berpotensi dimanfaatkan dalam pembangunan modul latihan dan pembangunan profesional kakitangan, khususnya dalam memberi pendedahan terhadap amalan penggunaan tenaga yang lebih beretika, bertanggungjawab, dan sejajar dengan objektif kelestarian institusi. Melalui latihan ini, kesedaran dalam kalangan warga kerja terhadap impak penggunaan tenaga yang tidak cekap dapat ditingkatkan, sekali gus menyumbang ke arah pengurangan jejak karbon institusi secara kolektif. Akhir sekali, hasil kajian ini boleh dijadikan sebagai asas dalam penyediaan garis panduan teknologi maklumat hijau (Green IT Guidelines) di peringkat institusi. Ia juga berupaya menyumbang kepada pembangunan model amalan terbaik yang boleh dirujuk oleh institusi lain, khususnya Kolej Komuniti, Politeknik dan universiti yang mungkin berdepan kekangan dari segi kepakaran teknikal dan sumber dalam pelaksanaan inisiatif kelestarian digital. Dengan adanya panduan ini, usaha pengurusan tenaga dapat dilaksanakan secara lebih tersusun, terarah dan bersifat jangka panjang.

3.3 Manfaat Sosial

Kajian ini menyumbang secara langsung kepada usaha global yang semakin giat dijalankan bagi memupuk tanggungjawab alam sekitar dalam kalangan pengguna teknologi, khususnya dalam persekitaran pembelajaran digital. Dalam era digitalisasi pendidikan yang pesat, pemupukan kesedaran terhadap kelestarian perlu digerakkan seiring dengan penerapan teknologi bagi memastikan pembangunan yang mampan dapat dicapai secara menyeluruh (Peters et al., 2023). Dengan memberi tumpuan khusus kepada institusi pendidikan, kajian ini turut menyokong aspirasi Matlamat Pembangunan Lestari (Sustainable Development Goals – SDGs), terutamanya SDG 4 (Pendidikan Berkualiti), SDG 7 (Tenaga Mampu Milik dan Bersih), dan SDG 13 (Tindakan Terhadap Perubahan Iklim). Justeru, hasil kajian ini bukan sahaja berupaya mempengaruhi dasar dan amalan institusi dari segi penggunaan teknologi secara lestari, malah juga dapat membentuk tingkah laku individu, iaitu pelajar dan pensyarah, agar lebih bertanggungjawab dalam penggunaan sumber tenaga digital (Racsko & Troll, 2020).

Lebih penting lagi, penerapan tabiat digital yang peka terhadap penggunaan tenaga jika dimulakan dari peringkat awal pendidikan dapat melahirkan generasi profesional masa hadapan yang lebih beretika, berpengetahuan, dan prihatin terhadap isu perubahan iklim serta kelestarian teknologi (Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024). Amalan seperti menutup peranti selepas digunakan, mengelakkan penggunaan tenaga secara berlebihan, dan menyokong sistem IT hijau merupakan sebahagian daripada nilai-nilai yang perlu dibudayakan secara konsisten dalam kalangan pelajar. Pada masa yang sama, pendekatan ini juga membuka ruang kepada pengaruh yang lebih meluas di luar kampus, khususnya dalam kalangan komuniti yang kurang terdedah kepada kesedaran digital dan alam sekitar. Dengan mengintegrasikan pendidikan kelestarian ke dalam kurikulum dan latihan berkaitan penggunaan teknologi, institusi pendidikan boleh memainkan peranan sebagai agen perubahan sosial yang efektif, sekali gus merapatkan jurang celik digital dan kesedaran alam sekitar dalam komuniti yang terpinggir (Podder & Samanta, 2022).

3.4 Implikasi Terhadap Industri

Industri teknologi pendidikan (EdTech) serta teknologi maklumat dan komunikasi (ICT) dijangka memperoleh pelbagai manfaat hasil daripada penemuan kajian berkaitan pengoptimuman penggunaan tenaga dalam persekitaran pendidikan. Hal ini kerana kajian ini menyediakan data empirikal yang relevan dan dapat dijadikan asas untuk pembangunan penyelesaian teknologi yang lebih lestari dan responsif terhadap isu alam sekitar. Sebagai contoh, dapatan kajian boleh dijadikan panduan dalam reka bentuk dan pembangunan platform e-pembelajaran berasaskan awan (*cloud-based learning platforms*) yang lebih cekap tenaga, serta penghasilan perkakasan pengkomputeran seperti komputer riba, pelayan (servers) dan terminal makmal yang menggunakan tenaga rendah dan menjimatkan sumber (Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024).

Selain itu, inovasi dalam bidang ini boleh diperluas lagi dengan mencadangkan sistem pensijilan kelestarian atau model pemarkahan (*scoring models*) untuk menilai tahap mesra alam sesuatu perisian atau perkakasan pendidikan (Akay, 2023). Langkah ini akan membantu meningkatkan ketelusan dan standard dalam industri teknologi pendidikan. Pada masa yang sama, pembekal perkhidmatan IT dan vendor turut berpeluang menjadikan kelestarian sebagai nilai teras dalam strategi pemasaran, reka bentuk produk dan operasi perniagaan mereka. Perkembangan ini selari dengan peningkatan permintaan terhadap penyelesaian teknologi yang mematuhi prinsip-prinsip Alam Sekitar, Sosial dan Tadbir Urus (Environmental, Social, and Governance – ESG), terutamanya dalam sektor pendidikan yang semakin terdedah kepada piawaian kelestarian global (Peters et al., 2023). Dengan merangka penyelesaian berasaskan prinsip ESG, syarikat bukan sahaja dapat memenuhi keperluan institusi pendidikan moden, tetapi juga dapat meningkatkan reputasi korporat mereka dalam pasaran yang semakin berorientasikan nilai kelestarian.

3.5 Cadangan Dasar

Penemuan daripada kajian ini berpotensi besar untuk menyumbang kepada penggubalan dan penambahbaikan dasar kelestarian digital, sama ada di peringkat institusi mahupun kebangsaan. Ini kerana hasil kajian bukan sahaja menyediakan data empirikal berkenaan amalan pengkomputeran hijau yang berkesan dalam konteks pendidikan, malah turut memperlihatkan potensi penjimatan tenaga dan peningkatan kesedaran dalam kalangan warga institusi pendidikan. Sehubungan itu, antara cadangan dasar yang boleh dirumuskan termasuklah penerapan amalan teknologi maklumat hijau (*Green IT*) secara piawai merentas semua peringkat institusi pendidikan, pengintegrasian indikator kelestarian dalam sistem penilaian prestasi akademik, serta penciptaan struktur insentif bagi menggalakkan pelaksanaan operasi kampus yang lebih mesra alam dan cekap tenaga (Peters et al., 2023).

Cadangan ini dapat menyokong keperluan institusi untuk menyesuaikan dasar pengurusan teknologi mereka dengan tuntutan pembangunan mampan. Tambahan pula, Kementerian Pendidikan serta agensi-agensi berkaitan pengajian tinggi boleh mengambil kira dapatan dan cadangan daripada kajian ini untuk diserapkan ke dalam pelan strategik pendidikan digital negara. Ini sekali gus dapat memantapkan hala tuju kelestarian digital secara menyeluruh, dan menjadikan prinsip kelestarian sebagai elemen teras dalam transformasi pendidikan era Revolusi Industri 4.0 (Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024). Lebih penting lagi, inisiatif yang berpaksikan dasar seperti ini mampu menjadi pemangkin kepada penyesuaian institusi pendidikan dengan penanda aras antarabangsa berkaitan kelestarian, seperti ISO 50001 (Pengurusan Tenaga) dan APUC Sustain IT. Institusi juga boleh berusaha mendapatkan pengiktirafan melalui pensijilan kampus hijau atau rangka kerja global seperti STARS (Sustainability Tracking, Assessment & Rating System) yang kini digunakan secara meluas dalam pengurusan kelestarian kampus di peringkat global (Podder & Samanta, 2022).

4. KESIMPULAN

Secara keseluruhannya, kajian konsep ini mengetengahkan keperluan mendesak untuk menerapkan pengkomputeran hijau dalam persekitaran pendidikan digital, selaras dengan tuntutan era Revolusi Industri 4.0 dan Matlamat Pembangunan Lestari (SDG). Berdasarkan dapatan literatur dan reka bentuk metodologi yang dicadangkan, pendekatan berasaskan strategi penjimatan tenaga melalui penyesuaian tetapan ICT, pemantauan penggunaan elektrik dan penilaian tingkah laku pengguna berpotensi memberi impak yang signifikan terhadap kecekapan penggunaan tenaga di institusi pendidikan. Kajian ini menekankan kepentingan integrasi antara teknologi dan etika kelestarian dalam membentuk ekosistem pembelajaran digital yang bertanggungjawab dan berkesan (Peters et al., 2023; Urban, Henriksen, & Scheiter, 2024). Tambahan pula, melalui pendekatan kuasi-eksperimen dan triangulasi data yang dirancang, kajian ini menyediakan asas kukuh untuk menghasilkan bukti empirikal berhubung hubungan antara kesedaran pengguna dengan tingkah laku penjimatan tenaga. Implikasi daripada pendekatan ini bukan sahaja menyumbang kepada penjimatan kos operasi institusi, tetapi turut membina budaya digital lestari dalam kalangan pelajar dan pendidik. Menurut Podder dan Samanta (2022), pendidikan mengenai amalan ICT hijau perlu dimulakan sejak awal bagi melahirkan pengguna teknologi yang peka terhadap alam sekitar, dan dapatan ini menyokong ke arah pembentukan garis panduan IT hijau di peringkat institusi pendidikan tinggi. Namun demikian, beberapa keterbatasan turut dikenalpasti seperti skop kajian yang terhad kepada satu institusi, tempoh intervensi yang singkat, serta cabaran teknikal berkaitan pengumpulan data tenaga. Walaupun langkah mitigasi seperti penggunaan alat pemantauan berganda dan protokol semakan harian telah dirancang, kajian ini tetap tertakluk kepada variasi tingkah laku peserta serta kekangan logistik tertentu. Oleh itu, kajian lanjutan yang melibatkan lebih banyak institusi, tempoh pemantauan yang lebih panjang, serta integrasi teknologi pemantauan berautonomi wajar dijalankan pada masa hadapan untuk meningkatkan kebolehgunaan dan kebolehumuman dapatan (Akay, 2023). Sebagai penutup, kajian ini bukan sahaja berupaya menjadi asas dalam pembangunan model teknologi pendidikan mampan, malah juga berperanan dalam menyokong dasar digital pendidikan negara. Melalui data empirikal yang kukuh dan pendekatan pelaksanaan yang realistik, ia dapat membantu institusi membentuk strategi pengurusan tenaga yang berstruktur serta selaras dengan prinsip ESG (Environmental, Social, Governance). Justeru, dengan memperkukuh kesedaran dan amalan pengguna serta memperkenalkan dasar yang menyokong teknologi lestari, transformasi pendidikan digital negara dapat dipacu ke arah masa depan yang lebih bertanggungjawab, cekap dan mampan (Racsko & Troll, 2020; Peters et al., 2023; Urban et al., 2024).

REFERENCES

- Akay, D. (2023). Sustainable ICT strategies in educational institutions: A practical framework. *Journal of Educational Technology & Society*, 26(1), 14–26.
- Akay, S. (2023). The green digital campus: Sustainable practices in eLearning and online education. *eLearning Industry*. <https://elearningindustry.com/green-digital-campus-sustainable-practices-in-elearning-and-online-education>
- Peters, A.-K., Capilla, R., Coroamă, V. C., Haldal, R., Lago, P., Leifler, O., Moreira, A., Fernandes, J. P., Penzenstadler, B., Porras, J., & Venters, C. C. (2023). Sustainability in computing education: A systematic literature review. *ACM Transactions on Computing Education*, 24(1), Article 13. <https://doi.org/10.1145/3639060>
- Peters, M. A., Besley, T., Arndt, S., & Misiaszek, G. W. (2023). Education, sustainability and digital transformation: Towards a new educational ecology. *Sustainability*, 15(1), 221. <https://doi.org/10.3390/su15010221>
- Podder, P., & Samanta, D. (2022). Green computing practices in higher education: Challenges and solutions. *International Journal of Green Computing*, 13(2), 45–58.
- Podder, S. K., & Samanta, D. (2022). Green computing practice in ICT-based methods: Innovation in web-based learning and teaching technologies. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/361671319_Green_Computing_Practice_in_ICT-Based_Methods_Innovation_in_Web-Based_Learning_and_Teaching_Technologies
- Racsko, P., & Troll, L. (2020). Energy consumption patterns of online education: A case study of European universities. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124190>
- Racsko, R., & Troll, E. M. (2020). Our digital education habits in the light of their environmental impact: The role of green computing in education. *Teaching Mathematics and Computer Science*, 18(1), 69–86. <https://doi.org/10.5485/TMCS.2020.0508>
- Urban, M., Henriksen, D., & Scheiter, K. (2024). Bridging the gap: A debate on sustainability aspects of digital media in education. *Education Sciences*, 15(2), 241. <https://doi.org/10.3390/educsci15020241>
- Urban, M., Henriksen, D., & Scheiter, K. (2024). Reimagining digital education: Sustainability and innovation in the age of AI. *Computers & Education*, 207, 104622. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.104622>