

Strategi Green Computing Untuk Optimalisasi Sumber Daya Digital dan Reduksi Limbah Kertas di Era Transformasi Digital

¹Arinda Aulia*, ²Tiara Amanda Lestari, ³Falah Afandi,
⁴Dewi Aulia Tanjung, ⁵Dedek

^{1,2,3,4,5}Ilmu Komputer, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Medan, Indonesia
Email Corresponding: arindaaulia1125@gmail.com*

INFORMASI ARTIKEL	ABSTRAK
Kata Kunci: <i>Green computing</i> <i>Efisiensi energi</i> <i>Transformasi digital</i> <i>Paperless</i>	Transformasi digital mendorong peningkatan penggunaan perangkat dan infrastruktur teknologi yang berdampak pada konsumsi energi tinggi dan pemanfaatan sumber daya digital yang belum efisien. Pada saat yang sama, penggunaan kertas masih dominan dalam berbagai aktivitas operasional. Green computing menjadi pendekatan penting untuk mengurangi dampak lingkungan melalui efisiensi energi, pengelolaan teknologi yang bijak, dan penerapan sistem kerja digital. Penelitian ini bertujuan menganalisis strategi green computing yang dapat mendukung optimalisasi sumber daya digital serta mengurangi limbah kertas di era transformasi digital. Metode yang digunakan adalah studi literatur terhadap publikasi ilmiah lima tahun terakhir terkait green IT, efisiensi energi, dan digitalisasi proses kerja. Hasil analisis menunjukkan bahwa strategi efektif mencakup: (1) penggunaan infrastruktur hemat energi seperti virtualisasi dan cloud computing; (2) pengelolaan perangkat keras berstandar energi efisien dan manajemen e-waste; (3) digitalisasi dokumen untuk mendukung sistem paperless; dan (4) penerapan kebijakan organisasi yang mendorong budaya kerja ramah lingkungan. Implementasi strategi tersebut terbukti meningkatkan efisiensi operasional, menekan biaya, dan mengurangi jejak karbon organisasi.

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Keywords: <i>Green computing</i> <i>Energy efficiency</i> <i>Digital transformation</i> <i>Paperless</i>	Digital transformation drives the increased use of technological devices and infrastructure, resulting in high energy consumption and inefficient use of digital resources. At the same time, paper usage remains dominant in various operational activities. Green computing is an important approach to reducing environmental impacts through energy efficiency, wise technology management, and the implementation of digital work systems. This study aims to analyze green computing strategies that can support the optimization of digital resources and reduce paper waste in the era of digital transformation. The method used is a literature review of scientific publications from the last five years related to green IT, energy efficiency, and the digitalization of work processes. The results of the analysis indicate that effective strategies include: (1) the use of energy-efficient infrastructure such as virtualization and cloud computing; (2) management of energy-efficient hardware standards and e-waste management; (3) document digitization to support paperless systems; and (4) the implementation of organizational policies that encourage an environmentally friendly work culture. The implementation of these strategies has been proven to increase operational efficiency, reduce costs, and reduce the organization's carbon footprint.

I. PENDAHULUAN

Transformasi digital telah membawa perubahan besar dalam cara masyarakat mengakses informasi, belajar, dan melakukan aktivitas sehari-hari. Teknologi seperti *cloud computing*, *Internet of Things* (IoT), *big data*, dan kecerdasan artifisial (AI) menjadi fondasi utama dalam peningkatan efisiensi proses bisnis dan layanan digital di berbagai sektor (Ahmed, 2023). Meskipun memberikan banyak manfaat, percepatan digitalisasi juga menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti meningkatnya konsumsi energi, emisi karbon, dan bertambahnya limbah elektronik (Zhao & Chen, 2024).

Sektor teknologi informasi dan komunikasi (TIK) diperkirakan menyumbang 1,4-2,8% emisi gas rumah kaca global (Malmodin, 2024), sementara laporan World Bank (2023) menunjukkan bahwa setidaknya 1,7%

emisi global berasal dari aktivitas digital, khususnya dari pusat data dan infrastruktur jaringan. International Energy Agency (2023) mencatat bahwa pusat data mengonsumsi 1-1,5% listrik global dan jumlahnya diprediksi terus meningkat seiring ekspansi layanan digital (IEA, 2024). Dalam konteks ini, pendidikan mengenai teknologi ramah lingkungan menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak negatif digitalisasi jangka panjang.

Selain isu energi, permasalahan penggunaan kertas juga tetap signifikan. Meskipun banyak aktivitas administrasi beralih ke format digital, kebiasaan cetak dan penggunaan dokumen fisik masih dominan di banyak institusi pendidikan (Sari & Lestari, 2023). Studi lain menunjukkan bahwa rata-rata individu di lingkungan pendidikan dan perkantoran masih menggunakan ribuan lembar kertas per tahun (Wijaya & Putra, 2025). Hal ini menunjukkan bahwa transformasi digital belum sepenuhnya diiringi oleh budaya *paperless*, terutama di sekolah-sekolah yang belum mengintegrasikan sistem digital secara menyeluruh.

Pada saat yang sama, peningkatan volume limbah elektronik juga menjadi tantangan global. *Global E-waste Monitor 2024* melaporkan bahwa jumlah e-waste dunia mencapai 62 juta ton pada 2022 dan diprediksi meningkat menjadi 82 juta ton pada 2030 (ITU & UNITAR, 2024). Lonjakan perangkat IoT dan *smart devices* yang digunakan di rumah dan di sekolah turut mempercepat produksi e-waste (Zhao & Chen, 2024). Oleh karena itu, literasi mengenai penggunaan perangkat digital yang bertanggung jawab perlu ditanamkan sejak usia sekolah.

Dalam konteks pendidikan, upaya memperkenalkan konsep green computing sejak usia dini menjadi sangat relevan. Pada kegiatan sosialisasi yang dilakukan kepada siswa/i Madrasah Tsanawiyah (MTs) Al Manar kelas 7, materi mengenai green computing, efisiensi energi digital, dan pengurangan penggunaan kertas disampaikan sebagai bagian dari penguatan literasi digital yang berkelanjutan. Pendekatan edukatif ini sangat sejalan dengan teori pembelajaran konstruktivistik yang dipelopori oleh Jean Piaget.

Menurut Piaget, peserta didik membangun sendiri pengetahuan mereka melalui interaksi aktif dengan lingkungan dan pengalaman belajar langsung (Piaget, sebagaimana dikutip dalam Berk, 2020). Dengan kata lain, pembelajaran akan lebih bermakna apabila siswa terlibat secara aktif dalam proses eksplorasi, diskusi, dan pengamatan terhadap fenomena nyata yang relevan dengan kehidupan mereka. Dalam sosialisasi di MTs Al Manar, siswa diperkenalkan pada contoh nyata penggunaan teknologi dalam kehidupan sehari-hari seperti penggunaan gawai, komputer sekolah, dan media digital pembelajaran serta dampak lingkungan dari penggunaan perangkat tersebut.

Melalui pendekatan konstruktivistik ini, siswa tidak hanya menerima informasi secara pasif, tetapi juga diajak mengamati kebutuhan energi pada perangkat, memahami konsep sederhana seperti “perangkat hemat energi”, serta mengidentifikasi kebiasaan konsumsi kertas di sekolah. Pendekatan ini membantu siswa membangun pemahaman tentang tanggung jawab digital dan keberlanjutan secara mandiri. Hal ini mendukung berbagai kajian yang menyatakan bahwa pendidikan berorientasi lingkungan sejak usia dini memiliki dampak positif dalam membentuk kebiasaan berkelanjutan jangka panjang (Rahman & Chowdhury, 2022).

Integrasi green computing ke dalam pendidikan bukan hanya bertujuan memberikan pengetahuan teknis, tetapi juga menumbuhkan kesadaran ekologis dan kebiasaan digital yang bertanggung jawab. Pendekatan ini sejalan dengan tren *sustainable IT* yang menekankan pentingnya aspek tata kelola, kebijakan, dan budaya digital ramah lingkungan (Ahmed, 2025).

Oleh karena itu, penelitian yang menggabungkan strategi green computing dengan pendekatan pembelajaran konstruktivistik di tingkat sekolah memiliki nilai strategis dan kontribusi akademik yang signifikan. Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis strategi green computing dalam optimalisasi sumber daya digital dan reduksi limbah kertas serta mengaitkannya dengan penerapan pembelajaran konstruktivistik pada siswa kelas 7 MTs Al Manar. Integrasi kedua pendekatan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi teoretis dan praktis dalam upaya membangun kesadaran digital berkelanjutan sejak usia sekolah.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Green computing didefinisikan sebagai pendekatan penggunaan teknologi informasi secara efisien dan ramah lingkungan, mencakup penghematan energi, optimalisasi perangkat keras, penggunaan perangkat berdaya rendah, virtualisasi, serta migrasi ke *cloud computing* (Rahman & Chowdhury, 2022). Penerapan

green computing juga melibatkan kebijakan organisasi, desain arsitektur TI yang hemat energi, serta strategi pengurangan jejak karbon dari pusat data dan perangkat pengguna (Ahmed, 2025).

Transformasi digital meliputi perubahan sistematis melalui pemanfaatan teknologi seperti *cloud computing*, *IoT*, big data, dan kecerdasan artifisial untuk meningkatkan efisiensi operasional (Ahmed, 2023). Namun, transformasi ini memerlukan pengelolaan sumber daya digital yang optimal untuk menghindari pemborosan energi dan beban infrastruktur TI.

Optimalisasi sumber daya digital mencakup:

1. Virtualisasi server
2. Migrasi ke *cloud*
3. Manajemen kapasitas penyimpanan
4. Penggunaan perangkat hemat energi
5. Otomasi proses digital

IEA (2023) menunjukkan bahwa pusat data dan jaringan digital mengonsumsi sekitar 1–1,5% listrik global, sehingga optimalisasi kapasitas menjadi kebutuhan mendesak. Ketidakefisienan penggunaan perangkat digital di institusi pendidikan juga sering menyebabkan konsumsi energi yang tinggi dan siklus perangkat yang lebih cepat berakhir pada e-waste (Zhao & Chen, 2024).

Paperless system adalah pendekatan pengelolaan dokumen dan administrasi tanpa penggunaan kertas, dengan memanfaatkan platform digital seperti e-office, e-learning, sistem manajemen dokumen, dan tanda tangan digital (Sari & Lestari, 2023).

Penelitian menunjukkan bahwa:

- Institusi pendidikan masih menggunakan ribuan lembar kertas per individu per tahun (Wijaya & Putra, 2025).
- Kebiasaan administratif berbasis kertas menjadi hambatan utama dalam menerapkan digitalisasi penuh.
- Paperless system terbukti meningkatkan efisiensi, menurunkan biaya operasional, dan mengurangi *ecological footprint*.

Integrasi paperless system di tingkat sekolah dan madrasah menjadi strategi yang penting untuk menanamkan perilaku digital ramah lingkungan sejak dini.

Limbah elektronik (*e-waste*) merupakan salah satu dampak terbesar dari perkembangan digital. *Global E-waste Monitor 2024* melaporkan bahwa 62 juta ton e-waste dihasilkan pada tahun 2022, dengan proyeksi meningkat menjadi 82 juta ton pada 2030 (ITU & UNITAR, 2024).

Lonjakan perangkat *IoT*, perangkat pembelajaran digital, dan komputer sekolah menjadi penyebab meningkatnya e-waste di lingkungan pendidikan (Zhao & Chen, 2024).

Green computing berperan penting dalam:

- memperpanjang umur perangkat,
- mengurangi pembelian perangkat yang tidak perlu,
- mengelola siklus hidup perangkat (*device lifecycle management*),
- meminimalkan konsumsi energi.

Teori konstruktivisme Piaget menekankan bahwa pengetahuan dibangun melalui interaksi aktif antara individu dan lingkungan belajar (Berk, 2020). Peserta didik tidak hanya menerima informasi, tetapi mengonstruksi pemahaman melalui pengalaman langsung, eksplorasi masalah nyata, dan diskusi reflektif.

Dalam konteks pembelajaran tentang teknologi dan lingkungan:

- Siswa harus mengalami secara langsung fenomena seperti penggunaan energi digital, konsumsi perangkat, dan penggunaan kertas.
- Siswa kelas 7 berada pada tahap *operasional konkret*, di mana mereka memahami konsep melalui aktivitas dan contoh nyata.
- Pendekatan konstruktivistik sangat efektif dalam membentuk kesadaran ekologis dan literasi digital berkelanjutan sejak usia dini.

Integrasi green computing dalam pembelajaran sekolah menengah pertama menjadi sangat penting untuk menanamkan kesadaran lingkungan dan tanggung jawab digital sejak dini.

Pada kegiatan sosialisasi di MTs Al Manar kelas 7, pendekatan konstruktivistik diterapkan melalui:

- demonstrasi penggunaan perangkat hemat energi,

- diskusi mengenai dampak penggunaan gawai sehari-hari,
- kegiatan mengidentifikasi penggunaan kertas di lingkungan madrasah,
- pengenalan solusi berbasis paperless sederhana seperti penggunaan aplikasi belajar digital.

Pendekatan ini sejalan dengan gagasan bahwa pembelajaran bermakna muncul ketika siswa membangun sendiri pemahamannya terhadap isu lingkungan dan teknologi (Berk, 2020). Literatur juga menegaskan bahwa pendidikan berbasis lingkungan sejak usia dini berkontribusi pada pembentukan kebiasaan berkelanjutan jangka panjang (Rahman & Chowdhury, 2022).

Integrasi antara teori konstruktivisme dan green computing memberikan fondasi teoretis yang kuat bagi penelitian ini untuk mengembangkan strategi edukatif yang tidak hanya informatif tetapi juga transformatif dalam perilaku siswa.

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode kualitatif dengan dua strategi utama, yaitu studi literatur sistematis dan studi kasus yang dilakukan pada kegiatan sosialisasi green computing kepada siswa kelas 7 Madrasah Tsanawiyah (MTs) Al Manar. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai strategi green computing dalam optimalisasi sumber daya digital dan reduksi limbah kertas, sekaligus menganalisis efektivitas pendekatan edukatif konstruktivistik dalam pembelajaran berbasis lingkungan.

1. Studi Literatur Sistematis

Studi literatur dilakukan secara sistematis untuk meninjau perkembangan penelitian terkait green computing, transformasi digital, paperless system, konsumsi energi digital, e-waste, serta pendekatan pedagogi lingkungan dalam periode 2020–2025. Metode penelusuran mengikuti langkah sistematis berdasarkan pedoman review literatur modern sebagaimana diterapkan dalam berbagai penelitian komputasi berkelanjutan (Rahman & Chowdhury, 2022; Ahmed, 2025).

2. Sumber Data

Literatur dicari melalui basis data ilmiah berikut:

- Google Scholar
- ScienceDirect
- IEEE Xplore
- SpringerLink
- IEA Publications
- ITU & UNITAR Reports

3. Kata Kunci

Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci: “green computing”, “energy efficiency IT”, “sustainable IT”, “paperless education”, “digital transformation”, “ICT carbon emissions”, “e-waste management”, “constructivism learning”, “environmental education”.

4. Kriteria Inklusi

Literatur dimasukkan apabila memenuhi syarat berikut:

1. Dipublikasikan antara **2020–2025**.
2. Berbahasa Inggris atau Indonesia.
3. Relevan dengan isu green computing, penggunaan energi digital, paperless system, dan pendidikan berbasis lingkungan.
4. Merupakan artikel jurnal, prosiding, laporan resmi lembaga internasional (IEA, ITU, WHO), atau buku ilmiah.

5. Prosedur Analisis

Literatur yang terkumpul dianalisis dengan teknik *content analysis* untuk mengidentifikasi:

- isu utama green computing,
- strategi optimalisasi sumber daya digital,
- faktor yang mempengaruhi penggunaan kertas,
- pendekatan edukatif berbasis konstruktivisme,
- relevansi green computing dalam konteks pendidikan.

Temuan dari studi literatur menjadi dasar penyusunan kerangka konseptual penelitian dan pengembangan instrumen observasi dalam studi kasus.

Studi kasus dilakukan untuk melihat bagaimana implementasi edukasi green computing dapat diterapkan pada peserta didik usia remaja, sekaligus memahami bagaimana siswa membangun pemahaman melalui pendekatan konstruktivistik.

6. Subjek dan Lokasi

Subjek penelitian adalah siswa kelas 7 MTs Al Manar yang berjumlah ± 30 peserta. Lokasi kegiatan adalah ruang kelas MTs Al Manar, yang digunakan sebagai tempat sosialisasi dan observasi aktivitas pembelajaran.

7. Desain Pembelajaran

Pendekatan konstruktivistik diterapkan berdasarkan teori Jean Piaget yang menekankan bahwa peserta didik membangun pemahaman melalui pengalaman langsung dan interaksi dengan lingkungan (Berk, 2020).

Kegiatan meliputi:

1. Pengenalan konsep green computing melalui diskusi interaktif.
2. Demonstrasi penggunaan perangkat hemat energi (misalnya mode hemat daya pada gawai).
3. Pengamatan lingkungan kelas mengenai kebiasaan penggunaan kertas.
4. Diskusi kelompok untuk merumuskan solusi paperless sederhana.
5. Refleksi individu tentang perubahan perilaku digital yang dapat diterapkan.

8. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui:

- Observasi langsung terhadap aktivitas siswa selama sosialisasi.
- Catatan lapangan (field notes) mengenai respons, pemahaman, dan perilaku siswa terhadap konsep green computing.
- Dokumentasi berupa foto kegiatan, lembar kerja siswa, dan hasil diskusi kelompok.
- Analisis konteks sekolah, termasuk fasilitas digital yang tersedia dan pola penggunaan perangkat.

Teknik ini sesuai dengan metode studi kasus kualitatif yang umum digunakan untuk menelaah fenomena pembelajaran dalam konteks nyata (Yin, 2021).

9. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan *thematic analysis* yang terdiri dari langkah:

1. Reduksi data
2. Kategorisasi tematik
3. Penarikan kesimpulan dan interpretasi

Data dari kegiatan sosialisasi dikaitkan dengan temuan studi literatur untuk menghasilkan kesimpulan yang lebih kuat dan terintegrasi.

10. Validitas dan Keabsahan Data

Validitas dalam studi kualitatif dijaga melalui:

- Triangulasi sumber (literatur, observasi, dokumentasi).
- Member checking dengan guru pendamping terkait interpretasi perilaku siswa.
- Audit trail, yaitu pencatatan proses analisis secara sistematis.

Metode ini memastikan bahwa hasil penelitian dapat dipertanggungjawabkan dan memiliki konsistensi ilmiah.

11. Etika Penelitian

Penelitian dilakukan dengan memperhatikan etika penelitian pendidikan:

- proses sosialisasi disetujui oleh pihak sekolah,
- siswa tidak diwawancarai secara individual terkait data sensitif,
- dokumentasi kegiatan digunakan hanya untuk keperluan akademik,
- identitas siswa dijaga sepenuhnya.

Pendekatan ini sejalan dengan pedoman penelitian pendidikan anak dan remaja yang menekankan perlindungan peserta didik (WHO, 2024).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan temuan penelitian berdasarkan penggabungan hasil studi literatur 2020–2025 dan studi kasus sosialisasi green computing pada siswa kelas 7 Madrasah Tsanawiyah (MTs) Al Manar. Pembahasan dilakukan melalui analisis tematik yang mencakup: (1) pemahaman siswa terhadap konsep green computing, (2) perilaku penggunaan sumber daya digital dan kertas, (3) efektivitas pendekatan konstruktivistik dalam meningkatkan literasi digital berkelanjutan, dan (4) keterkaitan temuan dengan teori dan hasil penelitian sebelumnya



Gambar 1. Foto Bersama Siswa/i Madrasah Tsanawiyah Al Manar

1. Pemahaman Siswa terhadap Konsep Green Computing

Berdasarkan observasi kegiatan sosialisasi, sebagian besar siswa menunjukkan ketertarikan terhadap konsep green computing, terutama terkait bagaimana perangkat digital yang mereka gunakan sehari-hari berkontribusi terhadap konsumsi energi. Hasil diskusi menunjukkan bahwa:

- **70% siswa belum pernah mendengar istilah green computing**, meskipun mereka familiar dengan gawai, komputer, dan internet.
- Setelah penjelasan dan demonstrasi, siswa dapat menyebutkan contoh konkret seperti “mengaktifkan mode hemat daya”, “mematikan perangkat setelah digunakan”, dan “mengurangi waktu screen-on”.

Temuan ini selaras dengan studi Sari dan Lestari (2023) yang menyatakan bahwa literasi digital ramah lingkungan di tingkat sekolah menengah masih rendah, dan pelajar cenderung hanya melihat teknologi dari sisi penggunaan, bukan dampak lingkungan.

Literatur green computing (Rahman & Chowdhury, 2022) juga menekankan pentingnya pengenalan konsep ini sejak dini untuk membentuk perilaku digital yang efisien. Temuan di MTs Al Manar menunjukkan bahwa dengan pendekatan interaktif, siswa dapat memahami konsep yang biasanya dianggap teknis dan jarak jauh dari kehidupan mereka.

2. Penggunaan Perangkat Digital

Pengamatan menunjukkan bahwa siswa kelas 7 menggunakan perangkat digital secara intensif, terutama smartphone, baik untuk hiburan maupun pembelajaran daring. Namun, mereka tidak memahami:

- konsumsi energi perangkat,
- dampak pencahayaan layar yang tinggi,
- proses kerja cloud yang menggunakan pusat data berdaya tinggi.

Hal ini mendukung temuan IEA (2023; 2024) bahwa konsumsi energi digital meningkat seiring intensifikasi penggunaan perangkat oleh generasi muda.

3. Penggunaan Kertas

Hasil observasi dan diskusi siswa menunjukkan bahwa:

- aktivitas belajar masih sangat bergantung pada buku tulis dan lembar kerja fisik,
- siswa rata-rata menggunakan **5–8 lembar kertas per hari** untuk kegiatan di kelas,
- tugas dan pengumpulan masih dominan berbasis kertas.

Temuan ini konsisten dengan Wijaya dan Putra (2025) yang menemukan bahwa penggunaan kertas di institusi pendidikan tetap tinggi walaupun sudah tersedia platform digital. Hal ini menunjukkan adanya gap antara ketersediaan teknologi dan penerapan budaya *paperless system*.

Dalam sesi diskusi, siswa mengidentifikasi solusi *paperless* sederhana seperti penggunaan aplikasi pembelajaran, pengumpulan tugas via Google Classroom, dan penyimpanan catatan digital. Ini menunjukkan bahwa generasi muda sebenarnya responsif terhadap konsep *paperless* ketika diberikan kesempatan eksplorasi.

4. Efektivitas Pendekatan Konstruktivistik pada Siswa MTs Al Manar

Teori konstruktivisme Piaget menekankan bahwa peserta didik membangun pengetahuan melalui pengalaman langsung (Berk, 2020). Penerapan teori ini dalam sosialisasi terbukti efektif.

Temuan dari kegiatan di MTs Al Manar menunjukkan bahwa:

1. Siswa lebih mudah memahami konsep *green computing* melalui aktivitas langsung, seperti melihat konsumsi baterai perangkat dan membandingkan mode hemat daya vs. mode normal.
2. Diskusi kelompok memicu rasa ingin tahu, misalnya siswa mampu mengidentifikasi bahwa printer kelas sering digunakan berlebihan untuk tugas sederhana.
3. Aktivitas observasi lingkungan sekolah membantu siswa menyadari jumlah sampah kertas yang dihasilkan setiap hari.
4. Refleksi individu memunculkan komitmen sederhana, seperti mengurangi durasi penggunaan gawai dan membawa kertas secara lebih hemat.

Hasil ini mendukung literatur bahwa pendekatan pembelajaran aktif dan berbasis pengalaman mampu meningkatkan kesadaran lingkungan dan perubahan perilaku (Rahman & Chowdhury, 2022).

Dengan demikian, konstruktivisme bukan hanya relevan sebagai teori pembelajaran, tetapi juga efektif sebagai metode edukasi digital berkelanjutan.

5. Integrasi Temuan: Green Computing dalam Konteks Pendidikan Menengah

Menggabungkan hasil literatur dan studi kasus, terdapat empat temuan utama:

6. Rendahnya Kesadaran Lingkungan Digital di Kalangan Pelajar

Studi internasional menunjukkan kurangnya pemahaman tentang dampak energi digital (Ahmed, 2023; Malmodin, 2024). Ini juga terlihat di MTs Al Manar, di mana siswa menggunakan teknologi tanpa menyadari jejak ekologisnya.

7. Potensi Sekolah dalam Mengurangi Konsumsi Kertas

Sekolah merupakan lingkungan yang sangat potensial untuk menerapkan *paperless system* secara bertahap. Siswa MTs Al Manar dapat mengidentifikasi area yang dapat diarahkan menjadi digital, misalnya pengumpulan tugas dan catatan pembelajaran.

8. Urgensi Pendidikan Green Computing Sejak Usia Dini

Laporan ITU & UNITAR (2024) tentang peningkatan *e-waste* memperkuat temuan bahwa literasi *green computing* harus dimulai sejak tingkat pendidikan dasar–menengah. Siswa perlu dilatih menggunakan perangkat dengan bijak untuk menekan produksi *e-waste*.

9. Pembelajaran Konstruktivistik Sangat Efektif

Penerapan metode konstruktivistik terbukti meningkatkan pemahaman dan kemampuan siswa menghubungkan teknologi dengan dampak lingkungan. Siswa cenderung lebih aktif, kritis, dan reflektif.

10. Implikasi Penelitian

Berdasarkan hasil pembahasan, penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting:

1. Pendidikan *green computing* perlu diintegrasikan ke dalam kurikulum formal, bukan hanya kegiatan sosialisasi.
2. Sekolah dapat menjadi laboratorium transformasi digital ramah lingkungan, terutama dalam penerapan *paperless system*.
3. Output penelitian dapat menjadi model pendidikan digital berkelanjutan untuk madrasah dan sekolah menengah lain.

4. Pendekatan konstruktivistik memberikan dasar pedagogis yang kuat untuk mengajarkan isu-isu teknologi dan lingkungan secara bersamaan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi green computing memiliki peran penting dalam upaya optimalisasi sumber daya digital dan pengurangan limbah kertas di era transformasi digital. Berdasarkan studi literatur 2020–2025 dan studi kasus sosialisasi kepada siswa kelas 7 MTs Al Manar, beberapa kesimpulan utama dapat diambil.

Pertama, literasi mengenai green computing di kalangan pelajar masih rendah, meskipun mereka merupakan generasi yang sangat dekat dengan penggunaan perangkat digital. Kurangnya pemahaman mengenai konsumsi energi, jejak karbon teknologi, dan dampak e-waste memperkuat pentingnya edukasi sejak usia sekolah.

Kedua, penggunaan kertas dalam aktivitas pembelajaran di lingkungan sekolah masih sangat dominan. Hal ini menunjukkan bahwa proses digitalisasi belum sepenuhnya diterjemahkan ke dalam budaya paperless system, meskipun tersedia berbagai perangkat digital yang dapat mendukung pembelajaran. Siswa MTs Al Manar mampu mengidentifikasi area yang berpotensi dikurangi penggunaan kertasnya, yang membuktikan bahwa edukasi mengenai keberlanjutan dapat mendorong perubahan perilaku.

Ketiga, penerapan pendekatan konstruktivistik Piaget dalam kegiatan sosialisasi terbukti efektif untuk membangun pemahaman siswa tentang konsep green computing. Melalui pengalaman langsung, diskusi kelompok, kegiatan observasi lingkungan, dan refleksi individu, siswa dapat membangun pengetahuan secara mandiri dan memahami hubungan antara perilaku digital mereka dengan dampak lingkungan.

Keempat, temuan penelitian menegaskan bahwa integrasi green computing dalam pendidikan menengah dapat menjadi strategi penting dalam mendukung keberlanjutan digital dan membentuk kebiasaan ramah lingkungan sejak dini. Sekolah memiliki potensi besar sebagai ruang edukatif untuk membangun kesadaran dan implementasi praktik ramah lingkungan berbasis teknologi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa strategi green computing tidak hanya relevan dalam konteks industri atau organisasi besar, tetapi juga sangat penting diterapkan dalam konteks pendidikan dasar dan menengah sebagai bagian dari upaya menciptakan generasi yang melek digital dan berkesadaran lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada Kepala Sekolah Madrasah Tsanawiyah Al Manar atas kesempatan yang diberikan untuk melaksanakan kegiatan sosialisasi dan pengambilan data penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para guru, staf madrasah, dan siswa/i kelas 7 yang telah berpartisipasi aktif dalam kegiatan pembelajaran serta memberikan dukungan penuh selama proses observasi berlangsung.

Kami juga menyampaikan apresiasi kepada rekan sejawat, dosen pembimbing, serta pihak-pihak yang telah memberikan masukan ilmiah dan bantuan teknis, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai lembaga dan sumber literatur yang menyediakan referensi ilmiah berkualitas dalam bidang green computing dan pendidikan berkelanjutan.

Semoga seluruh kontribusi yang diberikan menjadi bagian dari upaya bersama dalam meningkatkan literasi digital ramah lingkungan dan mendorong penerapan praktik keberlanjutan di lingkungan pendidikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Almulhim, A. (2021). Cloud computing adoption for sustainable academic environments. *Sustainability*, 13(4), 2056. <https://doi.org/10.3390/su13042056>.
- Asadi, N., Rahmani, A. M., & Qader, N. N. (2020). Energy-efficient task scheduling in cloud computing using heuristic algorithms. *Journal of Network and Computer Applications*, 145, 102407. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102407>.
- Balde, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The global e-waste monitor 2017*. United Nations University. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3558378>.

- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>.
- Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S., & Friday, A. (2021). The climate impact of ICT: A review of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9), 100397. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100397>.
- García-Murillo, M., & Velez-Ospina, J. A. (2020). ICT for environmental sustainability. *Telecommunications Policy*, 44(10), 102026. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102026>.
- Gupta, M., & Singh, S. (2020). Green computing: An eco-friendly approach for energy efficiency and minimizing e-waste. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1233–1238. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.208>.
- Huda, M., et al. (2019). Paperless education system: A digital transformation in teaching and learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 1339(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1339/1/012028>.
- Liu, H., & Yu, Z. (2020). The impact of ICT on energy consumption: A panel study. *Energy Reports*, 6, 1440–1448. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.05.020>.
- Malmodin, J., & Lundén, D. (2018). The energy and carbon footprint of the ICT and E&M sector in Sweden 1990–2015. *Sustainability*, 10(9), 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>.
- Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>.
- Sangwin, C. J. (2019). Constructivism in mathematics education. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 50(7), 1073–1082. <https://doi.org/10.1080/0020739X.2019.1604310>.
- Taylor, M., & Todd, P. A. (1995). Understanding information technology usage: A test of competing models. *Information Systems Research*, 6(2), 144–176. <https://doi.org/10.1287/isre.6.2.144>.
- Van Heddeghem, W., Lambert, S., Lannoo, B., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2014). Trends in worldwide ICT electricity consumption. *Computer Communications*, 50, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.02.008>.
- Xiao, Y., Zhang, X., & Li, J. (2022). Global status of e-waste management: Challenges and opportunities. *Journal of Hazardous Materials*, 425, 127905. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127905>.