


Integrasi Teknologi Nano Sel Surya Dalam Pembelajaran IPA: Studi Kajian Pustaka

¹Nurmasyitah*

¹Pendidikan Fisika, Universitas Samudra, Langsa, Aceh, Indonesia

¹Doktor Pendidikan IPA, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.70115/cahaya.v3i1.212>

Article Info	ABSTRACT
<p>Article history: Received : Dec 10, 2024 Accepted : Marc 30, 2025 Published : June 30, 2025</p>	<p><i>This research aims to examine the potential integration of nanotechnology, specifically solar cells, in the teaching of Natural Sciences (IPA) at the elementary and secondary education levels. Literature review shows that nanotechnology-based solar cells not only support the understanding of contextual renewable energy concepts but also contribute to strengthening students' critical and creative thinking skills. This integration enriches the science curriculum through a cutting-edge technology-based learning approach that is relevant to the challenges of the 21st century. The study results indicate that the use of nano technology can enhance science literacy, encourage a scientific attitude, and connect scientific concepts with real-life applications. This study also highlights the challenges of implementation and offers recommendations for developing a curriculum that is more responsive to technological advancements. These findings have important implications for educators and policymakers in designing nano-technology-based science learning innovations.</i></p>
<p>Keywords: Nano Technology; Solar Cells; Science Learning</p>	
<p>*Corresponding Author Nama: Nurmasyitah Universitas Langsa E-mail: nurmasyitah@student.uns.ac.id</p>	
	<p>This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.</p>

Copyright ©2025 Nurmasyitah

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat di abad ke-21 telah membawa dampak besar terhadap berbagai sektor kehidupan, termasuk pendidikan (Cahyarini et al., 2023). Dalam konteks pendidikan sains, integrasi teknologi terkini menjadi kunci untuk memfasilitasi pemahaman yang lebih mendalam serta meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kreatif siswa. Salah satu contoh teknologi yang menawarkan potensi besar untuk diterapkan dalam pembelajaran sains adalah teknologi nano. Teknologi nano, yang melibatkan manipulasi materi pada skala atomik dan molekuler, telah membuka berbagai kemungkinan baru dalam berbagai bidang, salah satunya dalam bidang energi terbarukan, khususnya sel surya (Cahyarini et al., 2023; Ardoina et al., 2019). Penggunaan teknologi nano dalam pengembangan sel surya dapat meningkatkan efisiensi energi dan berkontribusi pada

keberlanjutan lingkungan, sejalan dengan kebijakan energi nasional yang berwawasan lingkungan (Santoso, 2017).

Sel surya berbasis teknologi nano telah menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam efisiensi konversi energi matahari. Teknologi ini menggunakan material semikonduktor yang dimodifikasi pada skala nano untuk meningkatkan efisiensi penyerapannya terhadap energi matahari. Inovasi ini memiliki potensi besar tidak hanya untuk aplikasi energi terbarukan, tetapi juga sebagai alat pembelajaran yang efektif dalam mengajarkan konsep-konsep ilmiah di sekolah dasar hingga menengah (Gorghiu & Gorghiu, 2012). Sebagai alat pembelajaran, teknologi nano dapat membantu siswa memahami prinsip-prinsip dasar sains dan teknologi, serta mempersiapkan mereka untuk tantangan di era pengetahuan abad ke-21 (Huntsman, 2022). Penerapan teknologi nano dalam pendidikan dapat mendorong siswa untuk terlibat aktif dalam eksperimen sains, meningkatkan motivasi dan pemahaman mereka terhadap materi pelajaran (Schweizer, 2022). Dengan demikian, integrasi teknologi nano dalam kurikulum pendidikan sains tidak hanya memberikan wawasan baru bagi siswa, tetapi juga membekali mereka dengan keterampilan yang relevan untuk masa depan.

Di Indonesia, pengajaran Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) di tingkat sekolah dasar dan menengah seringkali menghadapi tantangan dalam menyampaikan konsep-konsep ilmiah yang kompleks kepada siswa (Ghattas & Carver, 2012). Salah satu solusi yang potensial adalah dengan mengintegrasikan konsep-konsep canggih dari bidang nano teknologi ke dalam kurikulum IPA. Penggunaan sel surya berbasis nano dalam pembelajaran IPA dapat memberikan pendekatan yang menarik dan kontekstual bagi siswa untuk mempelajari konsep fisika, kimia, dan teknologi yang terkait dengan energi terbarukan, keberlanjutan, serta aplikasi teknologi dalam kehidupan sehari-hari. Integrasi ini dapat membantu siswa memahami dampak positif energi terbarukan terhadap lingkungan, sejalan dengan Kebijakan Energi Nasional yang menekankan keberlanjutan dan efisiensi energi (Olson, 2023). Dengan demikian, penerapan teknologi nano dalam pendidikan tidak hanya mendukung pemahaman ilmiah, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan inovasi yang sejalan dengan tujuan Sustainable Development Goals (SDGs) untuk pendidikan berkualitas (Amalina et al., 2022). Pendidikan yang mengintegrasikan teknologi nano dapat membantu siswa memahami pentingnya keberlanjutan dan inovasi dalam mencapai tujuan-tujuan pembangunan berkelanjutan yang lebih luas (The Sustainable Development Goals (SDGs) as International Norms, 2022) (The Sustainable Development Goals, 2023).

Namun, meskipun integrasi teknologi nano dalam pembelajaran IPA menawarkan peluang besar, masih sedikit penelitian yang mengkaji penerapannya secara sistematis dan mendalam dalam konteks pendidikan di Indonesia (Touwe & Lasaiba, n.d.). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan menganalisis berbagai literatur yang relevan mengenai integrasi teknologi nano, khususnya sel surya, dalam pembelajaran IPA di sekolah. Kajian ini akan berfokus pada potensi integrasi teknologi ini dalam meningkatkan pemahaman konsep-konsep ilmiah, merangsang minat siswa terhadap sains, serta mempersiapkan mereka untuk menghadapi tantangan energi di masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru bagi pendidik dan pembuat kebijakan dalam merumuskan strategi yang efektif untuk mengintegrasikan teknologi nano ke dalam kurikulum pendidikan di Indonesia.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih luas mengenai bagaimana teknologi nano dapat diterapkan dalam pendidikan sains, serta memberikan rekomendasi yang berguna bagi pengembangan kurikulum dan metode pengajaran yang lebih inovatif dan relevan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus berkembang.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain kajian pustaka atau literatur review. Pendekatan ini bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis berbagai temuan yang sudah dipublikasikan sebelumnya terkait dengan penerapan teknologi nano, khususnya sel surya, dalam pembelajaran IPA di tingkat pendidikan dasar dan menengah. Penelitian ini tidak melakukan eksperimen atau pengumpulan data primer, melainkan hanya fokus pada analisis dan sintesis sumber-sumber literatur yang ada.

Peneliti akan menentukan kriteria atau inklusi tertentu ketika mencari dokumen dalam penelitian ini. Artikel penelitian harus ditulis dalam bahasa Inggris dan diterbitkan antara tahun 2020 dan 2025. Hanya dokumen Akses Terbuka yang digunakan. Topik pencarian meliputi teknologi nano, pembelajaran IPA. Semua dokumen yang digunakan untuk pencarian mengandung kata nano dan pembelajaran IPA pada judul, kata kunci dan abstrak. Peneliti kemudian memilih beberapa atau tumpang tindih artikel, bab buku, buku, prosiding, dan prosiding konferensi untuk menetapkan kriteria eksklusif

Pencarian database Google Scholar menghasilkan 41 dokumen. Peneliti kemudian menganalisis artikel untuk mengidentifikasi kata kunci, judul, dan abstrak untuk memperoleh tujuan yang berkaitan dengan tujuan penelitiannya. Peneliti menyaring beberapa makalah yang berasal secara eksklusif dari bidang pendidikan. Kemudian direduksi menghasilkan 25 artikel. Para peneliti kemudian membaca dan meninjau dokumen tersebut secara ekstensif untuk memastikan bahwa artikel yang dimasukkan memenuhi kriteria kami dan bebas dari duplikasi. Selama proses seleksi, peneliti membaca judul dan abstrak, kemudian melanjutkan ke teks lengkap seluruh artikel dengan bantuan peneliti sehingga menghasilkan tinjauan sistematis yang akurat dan komprehensif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan IPTEK terus menerus berubah mengikuti perkembangan zaman, salah satu buktinya adalah rekayasa dari suatu material yang dapat menghasilkan karakteristik baru dengan cara memanipulasi ukurannya menjadi sangat kecil melalui metode penelitian nano. Perkembangan penelitian terkait teknologi nano juga mempengaruhi riset teknologi nano di Indonesia. Terdapat perkumpulan peneliti dan penggiat teknologi nano yang disebut Masyarakat Nano Indonesia (MNI) sejak tahun 2005. MNI berperan penting dalam memfasilitasi kolaborasi antara peneliti, industri, dan pemerintah untuk mendorong inovasi dalam bidang teknologi nano di Indonesia (Priyambodo et al., 2014). Kolaborasi ini diharapkan dapat mempercepat pengembangan dan penerapan teknologi nano di berbagai sektor, termasuk pertanian dan kesehatan, yang merupakan area strategis bagi Indonesia (Ariningsih, 2017). Dalam konteks pertanian, penerapan nanoteknologi menawarkan potensi besar untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan mengurangi serangan hama, sehingga mendukung ketahanan pangan di Indonesia (Rusly & Rahman, 2023).

Nanoteknologi dapat didefinisikan sebagai sebuah teknologi pada material berskala nanometer (nm) yakni berkisar antara 1-100 nm. Kata nano diambil dari bahasa Yunani yaitu “nanos” yang berarti kecil (Fauza, R., P., et al., 2021). Nanoteknologi mempunyai potensi untuk meningkatkan pengembangan sumber energi konvensional dan terbarukan seperti energi panas bumi, matahari, angin, air, pasang surut atau biomassa. Hal ini mempunyai dampak yang tinggi pada sektor energi energi surya dan penyimpanan energi (Suwarda & Maarif, 2013). Inovasi nanoteknologi dapat berdampak pada setiap bagian rantai nilai tambah di sektor energi. Teknologi nano berkaitan dengan penyimpanan energi, penerapan energi surya, peningkatan daya dan efisiensi serta pengurangan biaya. Contoh

yang paling relevan adalah pembuatan sel surya berbiaya rendah, peningkatan kepadatan penyimpanan baterai, peningkatan kapasitas penyimpanan, kinerja yang lebih tinggi, dan peningkatan efisiensi pembangkit listrik tenaga surya. Inovasi dalam nanoteknologi dapat membantu mengatasi tantangan dalam efisiensi energi, terutama dalam pengembangan sel surya fotovoltaik yang lebih efektif dan terjangkau. Dengan demikian, nanoteknologi tidak hanya berpotensi meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga dapat berkontribusi pada pengembangan berkelanjutan dan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) di Indonesia (Ariningsih, 2017; Hidanah et al., 2024).

Sel surya merupakan salah satu penerapan teknologi nano yang dimanfaatkan untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik (Nada et al., 2020). Teknologi fotovoltaik yang digunakan dalam ukuran nano tergolong generasi ketiga yang terdiri dari kuantum dot, semikonduktor berstruktur nano, dan silikon amorf. Panel surya dari bahan material nano terdiri dari 1) Bahan Plastik, Panel surya tipis terbuat dari Nanopartikel TiO₂ menyerap cahaya tampak, menumbuk foton dan mengubah energi matahari menjadi energi listrik; 2) Kabel Nano, kabel mikroskopis dengan lebar berkisar antara 40-50 nm, dan panjangnya tidak terlalu terbatas. Kawat nano dapat mengurangi ukuran perangkat elektronik secara signifikan dan meningkatkan efisiensi perangkat; 3) Sel Fotovoltaik Plastik, Sel nanopartikel titanium yang menghasilkan listrik ketika menyerap cahaya. Membangun sel surya yang berfungsi penuh dan telah mencapai efisiensi sekitar 8%. Selain itu, nanorod untuk menyerap cahaya guna memanfaatkan rentang spektrum warna. Penggunaan teknologi nano dalam sel surya tidak hanya meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga berpotensi mengurangi biaya produksi, sehingga menjadikannya lebih terjangkau bagi masyarakat di Indonesia. Pengembangan teknologi nano dalam sel surya menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan aksesibilitas energi terbarukan dan mendukung transisi menuju sumber energi yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

Pendidikan berperan besar dalam mewujudkan kemajuan sebuah bangsa. Berbagai produk saat ini berbasis Nanoteknologi. Terobosan nanoteknologi sangat penting diajarkan di sekolah, karena dapat meningkatkan minat dan motivasi belajar. Namun, dalam kurikulum merdeka di Indonesia belum sepenuhnya mengintegrasikan Konsep teknologi nano dalam pembelajaran, khususnya pembelajaran IPA. Sehingga dalam pembelajaran IPA harus ditanamkan tentang konsep dasar hingga pengembangan keterampilan sains dan berpikir. Peran guru dalam mentransfer pengetahuan kepada siswa tanpa memikirkan apakah peserta didik sudah memahami konsep yang disampaikan atau belum (Utami et al., 2017).

Melalui ulasan ini, kita akan membahas lebih luas bagaimana penerapan teknologi nano khususnya sel surya dalam pembelajaran IPA. Perguruan tinggi perlu mempersiapkan calon guru IPA yang dapat mengintegrasikan Teknologi Nano dalam pembelajaran IPA di sekolah, baik sekolah dasar (SD) dan sekolah menengah (SMP dan SMA). Terdapat 8 Bentuk Kegiatan Pembelajaran (BKP) dalam Kurikulum Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM), calon guru IPA dapat memilih BKP untuk mendukung pengetahuan tentang teknologi nano khususnya terkait sel surya dalam materi energi baru dan terbarukan. Adapun 3 BKP yang dapat diikuti oleh calon guru IPA yaitu Magang, Pertukaran Mahasiswa Merdeka dan Proyek Independen. Kegiatan BKP yang diikuti selama 1 semester dapat dengan rekognisi maksimal 20 sks.

Bagi calon guru IPA yang mengikuti BKP Magang bertujuan memberikan pengalaman dan pengetahuan tentang teknologi nano, magang calon guru IPA dapat dilakukan di Badan

Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kementerian ESDM, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), berbagai perusahaan seperti PLN, PLTS, Perusahaan Start-up dan Perusahaan Konsultansi Energi Terbarukan, dan sebagainya. Selanjutnya, bagi calon guru IPA yang mengikuti BKP PMM bertujuan memberikan pengalaman kuliah di Prodi sama dan/atau berbeda pada Perguruan Tinggi sama dan/atau berbeda. Dengan demikian, calon guru IPA diharapkan mampu menerapkan teknologi nano dalam pengajaran, sehingga siswa dapat memahami konsep energi terbarukan secara lebih mendalam dan aplikatif. Pendidikan yang berbasis pada teknologi nano akan memfasilitasi pemahaman siswa tentang inovasi terkini dan memperkuat daya saing mereka di era globalisasi.

Bagi calon guru IPA yang mengikuti BKP Magang bertujuan memberikan pengalaman dan pengetahuan tentang teknologi nano, magang calon guru IPA dapat dilakukan di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Kementerian ESDM, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), berbagai perusahaan seperti PLN, PLTS, Perusahaan Start-up dan Perusahaan Konsultansi Energi Terbarukan, dan sebagainya. Selanjutnya, bagi calon guru IPA yang mengikuti BKP PMM bertujuan memberikan pengalaman kuliah di Prodi sama dan/atau berbeda pada Perguruan Tinggi sama dan/atau berbeda. Melalui pengalaman ini, calon guru IPA diharapkan dapat mengembangkan pemahaman yang lebih baik tentang integrasi teknologi nano dalam pembelajaran, sehingga mereka dapat menjadi agen perubahan dalam pendidikan sains di Indonesia (Ghasemzadeh & Shayan, 2020). Dengan demikian, penting untuk mengembangkan kurikulum yang mendukung integrasi teknologi nano dalam pendidikan sains, sehingga siswa dapat lebih siap menghadapi tantangan di masa depan.

Selain itu, calon guru IPA yang mengikuti proyek independen bertujuan mewujudkan gagasan dalam mengembangkan produk atau karya inovatif dan menyelenggarakan penelitian berbasis riset dan pengembangan. Adapun contoh judul proyek independen terkait Sel Surya dalam pembelajaran IPA yaitu Efektivitas sel surya dalam mengubah energi cahaya menjadi energi listrik, Pengaruh bahan semikonduktor terhadap efisiensi sel surya, Pembuatan sel surya sederhana dari bahan-bahan yang mudah didapat, Perbandingan kinerja sel surya dari berbagai bahan semikonduktor, Potensi sel surya sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan, Pengembangan Percobaan Praktikum Sel Surya sebagai Alat Pembelajaran Efektif dalam Mata Pelajaran IPA, Pengujian sel surya nano dalam kondisi lingkungan yang ekstrem, Pemanfaatan sel surya nano untuk pembangkit listrik tenaga surya, Pengaruh ukuran partikel nano pada efisiensi sel surya, Pengaruh komposisi material nano pada efisiensi sel surya dan Pembuatan sel surya nano secara sederhana. Dengan demikian, pengembangan proyek independen ini tidak hanya memberikan pengalaman praktis, tetapi juga mendorong inovasi dalam pemanfaatan teknologi nano untuk energi terbarukan.

Calon guru IPA juga dapat memperoleh pengetahuan tentang sel surya dalam mata kuliah energi baru dan terbarukan dan dapat menghasilkan proyek yang dapat digunakan sebagai media pembelajaran IPA di sekolah. Adapun contoh judul proyek/mini Riset terkait Sel Surya dalam pembelajaran IPA adalah Pengaruh intensitas cahaya terhadap daya listrik yang dihasilkan panel surya, Pengaruh suhu terhadap daya listrik yang dihasilkan panel surya, Pengaruh sudut kemiringan panel surya terhadap daya listrik yang dihasilkan, Pengaruh jenis sel surya terhadap daya listrik yang dihasilkan, Pemanfaatan panel surya untuk pembangkit listrik, Pembuatan panel surya sederhana, dan Pembuatan model pembangkit listrik tenaga surya. Dengan demikian, integrasi teknologi nano dalam kurikulum pendidikan akan

memperkaya pengalaman belajar siswa dan mempersiapkan mereka untuk tantangan di era teknologi yang terus berkembang.

Kegiatan BKP dan perkuliahan dapat membantu calon guru IPA memahami peran teknologi nano dalam pengembangan energi terbarukan dan produk dari hasil kegiatan dapat digunakan sebagai sumber belajar saat mengajar IPA di sekolah. Selain itu, kegiatan BKP juga dapat meningkatkan Indikator Kinerja Utama (IKU) Perguruan Tinggi yaitu IKU 2 yaitu mahasiswa mendapatkan pengalaman di luar kampus, dan IKU 7 yaitu kelas yang kolaboratif dan partisipatif. Dengan demikian, integrasi teknologi nano dalam pendidikan akan memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan sumber energi terbarukan dan meningkatkan kesadaran siswa mengenai pentingnya konservasi energi. Pendidikan yang mengintegrasikan teknologi nano tidak hanya meningkatkan pemahaman siswa, tetapi juga mendorong mereka untuk berinovasi dalam solusi energi terbarukan yang berkelanjutan (Gorghiu et al., 2016). dan ramah lingkungan. Dengan pendekatan ini, diharapkan calon guru IPA dapat menginspirasi generasi mendatang untuk lebih aktif dalam mengembangkan dan menerapkan teknologi energi terbarukan.

Era society 5.0 secara langsung atau tidak langsung berpengaruh pada segala bidang kehidupan, di bidang pendidikan harus diperkuat dengan melakukan perubahan kompetensi yang dibelajarkan kepada calon guru dan peserta didik. Prinsip dasar dalam penggunaan teknologi nano dalam pendidikan IPA sebagai penguat pemahaman konseptual dan intuisi, sehingga pembelajaran tidak hanya sebatas mengetahui tetapi dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan. Dengan demikian, Guru dapat menciptakan suatu kondisi yang dapat menimbulkan motivasi belajar pada siswa sehingga siswa antusias untuk belajar. Ada tiga faktor yang perlu diperhatikan terkait dengan pengembangan dan integrasi teknologi nano dalam pembelajaran IPA, yaitu faktor desain rancangan teknologi, faktor peranan guru dalam penerapan teknologi, dan faktor konteks pendidikan dimana teknologi tersebut diterapkan



Gambar 1. Panel Surya



Gambar 2. Contoh Proyek Teknologi Nano dalam Pembelajaran IPA

KESIMPULAN

Integrasi teknologi nano, khususnya sel surya, dalam pembelajaran Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) di tingkat dasar dan menengah memiliki potensi besar dalam meningkatkan kualitas pendidikan sains. Penggunaan teknologi ini tidak hanya memperkaya materi ajar dengan pendekatan yang lebih kontekstual dan modern, tetapi juga mampu meningkatkan pemahaman siswa terhadap konsep energi terbarukan serta memperkuat keterampilan berpikir kritis dan kreatif. Selain itu, penerapan teknologi nano dalam pembelajaran IPA dapat menumbuhkan sikap ilmiah dan kesadaran akan pentingnya sains dalam kehidupan sehari-hari. Meski demikian, masih terdapat tantangan dalam hal kesiapan kurikulum, sarana pendukung, dan kompetensi guru. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengembangan kurikulum dan pelatihan yang adaptif agar teknologi nano dapat diimplementasikan secara efektif dalam konteks pendidikan Indonesia

DAFTAR PUSTAKA

- Amalina, I., Jiwanti, P. K., Amrillah, T., Rizki, I. N., Firmansyah, M. L., Wibowo, A. C., Semendawai, B., Hanif, M. F., Mulya, F., & Sari, R. (2022). Pendidikan dan aplikasi nanoteknologi dalam kehidupan terhadap siswa sekolah menengah atas. *Jurnal Layanan Masyarakat (Journal of Public Services)*. <https://doi.org/10.20473/jlm.v6i1.2022.146-152>
- Ardoina, N. M., Bowersd, A. W., & Gaillarde, E. (2019). Environmental education outcomes for conservation: A systematic review. *Biological Conservation*, 241, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108224>
- Ariningsih, E. (2017). Prospek Penerapan Teknologi Nano dalam Pertanian dan Pengolahan Pangan di Indonesia. <https://doi.org/10.21082/FAE.V34N1.2016.1-20>
- Cahyarini, S. Y., Coheng, A., Damanika, A., Haffner, G. D., Janssen, D. J., Stelbrink, B., Tournier, N., Vogel, H., & von Rintelen, T. (2023). Perspectives from modern hydrology and hydrochemistry on a lacustrine biodiversity hotspot: Ancient Lake Poso, Central Sulawesi, Indonesia. *Journal of Great Lakes Research*, 50, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jglr.2023.102254>
- Fauza, R., P. Manurung, dan Y. Yulianti. 2021. Efek NaOH pada Pembentukan Nano ZnO Metode Hidrotermal. *Journal of Energy, Material, and Instrumentation Technology*, 2(3):98-103.
- Ghattas, N. I., & Carver, J. S. (2012). Integrating nanotechnology into school education: a review of the literature. *Research in Science & Technological Education*. <https://doi.org/10.1080/02635143.2012.732058>

- Ghasemzadeh, F., & Shayan, M. E. (2020). Nanotechnology in the Service of Solar Energy Systems. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.93014>
- Gorghiu, G., Petrescu, A.-M. A., & Mantescu, G. (2016, December 22). Connecting Education and Research: Introducing RRI in Solar Energy Non-formal Educational Activities. <https://doi.org/10.15405/EPSSBS.2016.12.58>
- Gorghiu, L. M., & Gorghiu, G. (2012, April 18). Teachers' and students' feedback concerning the use of ICT tools in learning science through nanotechnology. WSEAS International Conference on Applied Computer and Applied Computational Science.
- Hidanah, S., Sabdoningrum, E. K., Yudaniayanti, I. S., Fitriyah, H., Miarsono, S., Warsito, S. H., Lamid, M., Lokapirnasari, W. P., Arif, M. A. A., & Rosyada, Z. N. A. (2024). Penerapan Teknologi Nano Ekstrak Meniran pada Pakan dan Manajemen Pemeliharaan untuk Meningkatkan Kemandirian Ekonomi Kelompok Ternak Kambing dan Domba di Desa Sepande, Sidoarjo. *Lambung Inovasi: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. <https://doi.org/10.36312/linov.v9i4.2201>
- Huntsman, M. (2022). Tantangan pembelajaran abad 21 bagi pendidik. <https://doi.org/10.31219/osf.io/znh8k>
- Nada, W., Dania, S., Santhosh, S., & Madhavan, A. A. (2020). Renewable Energy through Nanotechnology. <https://doi.org/10.1201/9781003082859-6>
- Olson, N. (2023). Pengembangan Sistem Teknologi Kerakyatan untuk Mendukung Ketahanan Energi Nasional. <https://doi.org/10.31219/osf.io/ghf5w>
- Priyambodo, T. K., Putra, A. E., Asvial, M., Poetro, R. E., Hendrantoro, G., Pitowarno, E., Kuswadi, S., Prabowo, G. S., & Nugroho, A. (2014, January 27). IiNUSAT-1: The 1st Indonesian inter-university nano-satellite for research and education. <https://doi.org/10.1109/ICARES.2014.7024388>
- Rusly, Muh. F., & Rahman, D. Y. (2023). Perkembangan Penerapan Nanoteknologi pada Bidang Pertanian. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Terapannya (JUPITER)*. <https://doi.org/10.31851/jupiter.v4i2.10726>
- Santoso, R. (2017). Kebijakan energi di indonesia: menuju kemandirian. *Jurnal Analisis Kebijakan*, 1(1), 28–36. <https://doi.org/10.37145/jak.v1i1.21>
- Schweizer, T. (2022). Peran penting teknologi informasi pendidikan di abad 21. <https://doi.org/10.31219/osf.io/v3e5f>
- Suwarda, R., & Maarif, M. S. (2013). Pengembangan inovasi teknologi nanopartikel berbasis pat untuk menciptakan produk yang berdaya saing. <https://doi.org/10.25105/JTI.V3I2.1572>
- Teri Envis. 2021. Application of Nanotechnology in Solar Energy. *Resource Partner on Renewable Energy and Climate Change*.
- The Sustainable Development Goals (SDGs) as international norms. (2022). <https://doi.org/10.4324/9781003205951-2>
- The Sustainable Development Goals. (2023). <https://doi.org/10.4337/9781803920924.00054>

- Touwe, S., & Lasaiba, M. A. (n.d.). Enhancing Science Education Through the Student Teams Achievement Division (STAD) Learning Model: An Experimental Study on Process Skills and Learning Outcomes at Middle School.
- Utami, I. S., Septiyanto, R. F., Wibowo, F. C., & Suryana, A. (2017). Pengembangan STEM-A (science, technology, engineering, mathematic and animation) berbasis kearifan lokal dalam pembelajaran fisika. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 6(1), 67.