



Tersedia online di EDUSAINS
Website: <http://journal.uinjkt.ac.id/index.php/edusains>
EDUSAINS, 15 (2), 2023, 112-123



Research Artikel

TREN PENELITIAN PEMBELAJARAN BIOLOGI BERBASIS CITIZEN SCIENCE UNTUK MELATIHKAN KETERAMPILAN ABAD 21

Utari Akhir Gusti¹, Topik Hidayat^{2*}, Nur Hamidah³, Siti Sriyati⁴

^{1,2,3,4}Departemen Pendidikan Biologi, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
topikhidayat@upi.edu^{2*}

Abstract

Citizen science (CS) has become a popular research in world education. However, it is still very little implemented in Indonesia. Besides that, the presence of the 21st century requires students to have 4C skills. CS integration in learning has the potential to train these skills. So, it is necessary to conduct research on CS-based biology learning to train 21st century skills. The results can become a reference source and guide for relevant research. This research was conducted by collecting articles related to citizen science and 21st century skills. There were 16 articles used with Scopus accreditation from various countries in the world. The method used is systematic literature review with PRISMA analysis. The results of this research include biological concepts related to CS to train 21 skills, CS innovations in learning, sources and models used in CS involvement, 21st century skills that can be trained, and CS-based biology learning. The material that is mostly used is biodiversity. Meanwhile, learning resources with CS integration include online (applications and website) and offline. The model used consists of project-based learning and inquiry. Learning innovation with CS involvement in the form of a framework which can be used as an evaluation tool. The 21st century skills with which CS is most frequently reported are collaboration and communication. CS is becoming a promising option for education with collaboration between scientists, students, and society. This is an opportunity to practice 21st century skills in learning.

Keywords: *Biology; Citizen Science; Communication; Collaboration; Critical Thinking; Creative Thinking.*

Abstrak

Citizen science (CS) telah menjadi penelitian populer di pendidikan dunia. Namun, masih sangat sedikit dilaksanakan di Indonesia. Disamping itu, hadirnya abad 21 menuntut siswa untuk memiliki keterampilan 4C. Integrasi CS dalam pembelajaran berpotensi melatih keterampilan tersebut. Sehingga, perlu dilakukan penelitian mengenai pembelajaran biologi berbasis CS untuk melatih keterampilan abad 21. Hasilnya, dapat menjadi sumber referensi dan panduan untuk penelitian relevan. Penelitian ini dilakukan dengan mengumpulkan artikel yang berkaitan dengan citizen science dan keterampilan abad 21. Artikel yang digunakan sebanyak 16 dengan terakreditasi scopus dari berbagai negara dunia. Metode yang digunakan yaitu systematic literature review dengan analisis PRISMA. Hasil dari penelitian ini mencakup konsep biologi yang berhubungan melalui CS untuk melatih keterampilan 21, inovasi CS dalam pembelajaran, sumber dan model yang digunakan dalam pelibatan CS, Keterampilan abad 21 yang dapat dilatihkan, dan pembelajaran biologi berbasis CS. Materi yang mayoritas digunakan yaitu keanekaragaman hayati. Sedangkan untuk sumber belajar dengan integrasi CS mencakup online (aplikasi dan website) dan offline. Model yang digunakan terdiri dari project-based learning dan inkuiri. Inovasi pembelajaran dengan pelibatan CS berupa framework yang dapat digunakan sebagai alat evaluasi. Keterampilan abad 21 dengan pelibatan CS yang paling sering dilaporkan adalah kolaborasi dan komunikasi. CS menjadi pilihan yang menjanjikan untuk pendidikan dengan kolaborasi antara ilmuwan, siswa, dan masyarakat. Hal tersebut menjadi peluang untuk melatih keterampilan abad 21 dalam pembelajaran.

Keywords: Berpikir Kreatif; Berpikir Kritis; Biologi; Citizen Science; Kolaborasi; Komunikasi.

Permalink/DOI: <http://doi.org/10.15408/es.v13i2.35199>

How To Cite: Gusti, U. A., Hidayat, T., Hamidah, N., Sriyati, S. (2023). Tren Penelitian Pembelajaran Biologi Berbasis Citizen Science Untuk Melatihkan Keterampilan Abad 21. EDUSAINS, 15 (2): 112-123.

*Corresponding author

Received: 10 October 2023; Revised: 16 October 2023; Accepted: 27 December 2023

EDUSAINS, p-ISSN 1979-7281 e-ISSN 2443-1281

This is an open access article under CC-BY-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

PENDAHULUAN

Citizen Science (CS) adalah keterlibatan masyarakat dalam bidang pendidikan dan penelitian. CS pada penelitian pada umumnya digunakan sebagai pengumpul data, sedangkan dalam pendidikan biasanya digunakan untuk melatih keterampilan kolaborasi, komunikasi, berpikir kritis, dan berpikir kreatif (Miller-Rushing *et al.*, 2012). CS dalam penelitian ilmiah memiliki potensi untuk mengatasi masalah ilmiah dan sosial seperti konservasi keanekaragaman hayati (Shirk *et al.*, 2012). Hal ini menjadi salah satu langkah untuk kolaborasi warga dengan siswa dalam menyelesaikan masalah yang dihadapi. (Heigl *et al.*, 2019). Disamping itu, keterlibatan CS terbukti mampu melatih keterampilan abad 21 (Damayanti dkk, 2021). Integrasi CS dalam pendidikan membantu siswa untuk lebih peduli dengan pengetahuan dan memiliki keterampilan sesuai tuntutan zaman. Sehingga, hal ini menstimulus keterampilan siswa lebih cepat dan tepat.

CS telah memberikan kontribusi besar dalam pendidikan dunia. Banyak dari partisipan CS yang berusaha untuk mencapai hasil belajar dalam penerapannya. Hal tersebut didukung oleh penelitian yang mengungkapkan bahwa CS memberi kontribusi besar pada kognitif (Chandler *et al.*, 2017). Peneliti menjelaskan bahwa keterlibatan CS mampu melatih pengetahuan dan keterampilan abad 21 (Bonney *et al.*, 2016; Cornwell & Campbell, 2012; Jordan *et al.*, 2012; Lewandowski & Oberhauser, 2017; McKinley *et al.*, 2017; Trautmann *et al.*, 2012). Sementara itu, beberapa penelitian juga menunjukkan pencapaian beberapa hasil pembelajaran yang baik, namun sebagian lain belum mendokumentasikan hasil yang kuat (Bela *et al.*, 2016; Bonney, Cooper, *et al.*, 2016; Jordan *et al.*, 2012; Phillips *et al.*, 2018). Dapat diartikan bahwa CS memiliki potensi besar dalam upaya melatih keterampilan peserta didik di sekolah terutama keterampilan abad 21.

Kehadiran abad 21 menjadi krusial untuk melatih keterampilan yang harus dimiliki siswa. Keterampilan tersebut terdiri dari komunikasi, kolaborasi, berpikir kritis, dan berpikir kreatif (Nuraini, 2017; Mardhiyah *et al.*, 2021; Suryana & Iskandar, 2022). Keterampilan ini

perlu dilatihkan kepada siswa, sehingga terbiasa dan menjadi SDM yang mampu berdaya saing global. Penelitian relevan menemukan bahwa CS mampu melatih keterampilan abad 21 (Aripin, I., & Hidayat, 2020; Aripin, I., Hidayat, T., & Rustaman, 2021; Aripin, 2022). Peserta didik yang tidak memiliki kecakapan keterampilan tersebut akan tertinggal dan tidak mampu bertahan di tengah gempuran perkembangan zaman. Peluang yang dimiliki CS dalam melatih keterampilan 4C, namun tidak sebanding dengan penelitian yang dilakukan di Indonesia. Hal tersebut karena masih kurangnya penelitian yang menganalisis keterlibatan CS dalam melatih keterampilan abad 21 pada penelitian dunia. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis pembelajaran berbasis CS untuk melatih keterampilan abad 21 dari riset dunia. Sehingga, hasilnya dapat dijadikan pondasi bagi peneliti berikutnya maupun guru.

Penelitian sebelumnya telah menyoroti potensi manfaat CS untuk hasil belajar khususnya keterampilan abad 21 (Phillips *et al.*, 2018; Shirk *et al.*, 2012). Tidak hanya siswa, masyarakat yang terlibat juga memperoleh manfaat berupa keterampilan dan pengetahuan baru (Bela *et al.*, 2016). Namun, potensi CS untuk melatih keterampilan siswa tidak dapat dilakukan karena kurangnya informasi di Indonesia baik berupa panduan maupun referensi (Jordan *et al.*, 2012; Phillips *et al.*, 2018; Toomey, A. H., & Domroese, 2013). Penelitian ini penting dilakukan sesuai dengan tuntutan abad 21 dan minim penelitian yang membahas tren penelitian CS dalam dunia pendidikan. Tujuan penelitian ini untuk memberikan gambaran tentang tren penelitian CS dalam pembelajaran biologi untuk melatih kemampuan abad 21. Penelitian ini dapat menjadi dasar dan sumber informasi dalam implementasi integrasi CS untuk melatih keterampilan abad 21. Sehingga, peluang yang ada dapat dimanfaatkan dengan sebaiknya dalam rangka perbaikan kualitas sumber daya manusia Indonesia.

METODE

Kajian pada artikel ini termasuk *systematic literature review* (SLR). SLR merupakan sebuah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi,

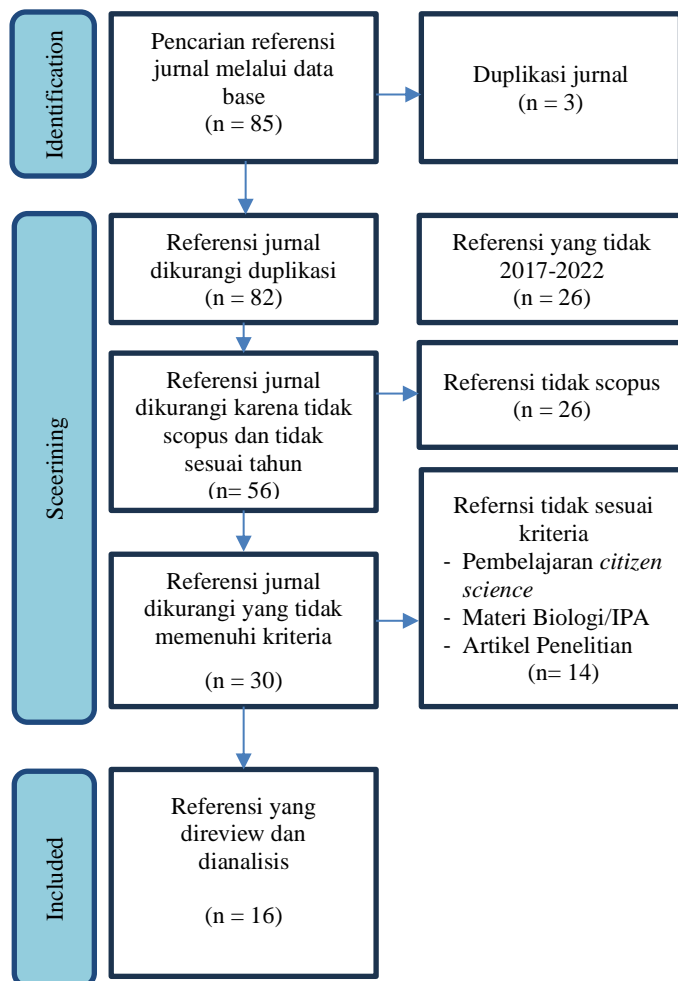
menganalisis, menilai, serta menafsirkan temuan pada topik penelitian yang menarik untuk dijawab (Aliyah & Mulawarman, 2020; Triandini et al., 2019). Sebelum dilakukan analisis, peneliti melakukan pengecekan jurnal dengan menggunakan Scimago Journal & Country Rank, sehingga diperoleh artikel yang bereputasi. Seleksi artikel dilakukan secara ketat dan sistematis dengan tujuan untuk mendapatkan hasil yang holistik dan komprehensif.

Penelitian SLR bertujuan untuk memberikan gambaran atau analisis tentang suatu topik (Suhartono, 2017). Sehingga, diperoleh gambaran literatur yang menyeluruh. Pada tinjauan literatur sistematis dicirikan oleh proses yang ketat dan terstruktur untuk mendapatkan hasil yang ingin digali oleh peneliti. Tinjauan sistematis dilaksanakan secara transparan, objektif, dan dapat direplikasi. Hal tersebut dengan mendasarkan pada pertanyaan penelitian yang jelas dan mengikuti struktur yang baik dan protokol pencarian yang terdokumentasi dengan baik serta kriteria inklusi dan pengecualian yang jelas yang menentukan studi mana yang akan disertakan dalam ulasan (Suhartono, 2017).

Sistematis mengikuti pedoman yang ditentukan pada PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (Abbasi et al., 2022; Mastan et al., 2022; Suryadi et al., 2023). Penelitian ini menganut prinsip analisis konten, yang difokuskan pada temuan dari berbagai penelitian yang telah dipublikasikan di jurnal ilmiah di Internasional. Proses seleksi dilakukan dengan kategori yaitu terbitan tahun 2017–2022, terindeks scopus Q1-Q4, penelitian biologi atau IPA. Kata kunci yang digunakan yaitu CS, pembelajaran biologi, dan keterampilan abad 21. Sehingga, diperoleh hasil data yang lebih maksimal dan relevan dengan penelitian yang dilaksanakan.

Analisis data dilakukan dengan tabulasi data dengan kategori yaitu materi biologi yang dibahas dengan keterlibatan CS, keterampilan abad 21 yang dapat dilatihkan dengan CS, inovasi CS dalam pembelajaran, sumber belajar & model yang digunakan, dan pembelajaran biologi berbasis CS. Artikel yang tidak memenuhi kategori tidak dianalisis untuk tahap selanjutnya. Pada akhirnya

diperoleh 16 artikel yang memenuhi kategori yang dirancang dalam penelitian ini. Proses seleksi artikel dapat dilihat pada Gambar 1.

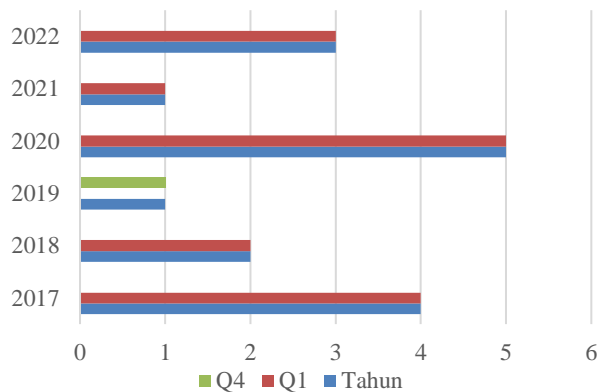


Gambar 1. Proses Seleksi Artikel

Pada Gambar 1, terlihat bahwa langkah awal artikel yang diperoleh berdasarkan kata kunci yang dituliskan yaitu sebanyak 85 artikel internasional. Setelah dilakukan pengecekan kembali dengan menggunakan scimago untuk memastikan artikel terindeks scopus. Artikel yang telah dicek menggunakan scimago, tahap selanjutnya dilakukan skimming untuk mengecek kesesuaian artikel yang digunakan. Artikel yang tidak sesuai dikeluarkan dan artikel yang sesuai masuk ketahap selanjutnya yaitu analisis mendalam berdasarkan kategori. Hasil analisis yang diperoleh dikumpulkan dan dikategorikan untuk dikelompok dan dihitung persentasi untuk keterampilan abad 21 serta pembelajaran biologi yang terlibat. Tahap akhir yaitu validasi hasil analisis bersama 3 dosen ahli. Data yang kurang valid dilakukan revisi sesuai masukan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Artikel yang telah diseleksi, diperoleh informasi bahwa metode yang digunakan dalam mengungkapkan hasil penelitian pada artikel terdiri dari metode kualitatif, kuantitatif, dan *mix-methode*. Paling banyak menggunakan penelitian kualitatif sebesar 9 artikel. Penelitian kuantitatif sebesar 6 artikel dan *mix-methode* sebanyak 1 artikel. Penggunaan metode pada artikel disesuaikan dengan tujuan penelitian yang dikemukakan oleh peneliti. Masih sedikit penggunaan metode penelitian *mix-methode*. Hal ini menjadi peluang untuk peneliti selanjutnya untuk melakukan penelitian *mix-methode* dalam mengungkapkan CS dalam dunia pendidikan. Teknik analisis data yang digunakan juga bervariasi, mulai dari tidak menggunakan uji statistik sampai menggunakan uji statistik deskriptif dan uji statistik inferensial. Data artikel yang digunakan dengan informasi tahun terbit dan indeksnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Kuartil artikel dan Tahun Terbit

Berdasarkan data pada Gambar 2, kategori Q1 memiliki 15 artikel yang terindeks, sedangkan kategori Q4 hanya memiliki satu artikel. Data tersebut juga menunjukkan variasi jumlah artikel yang diterbitkan dari tahun ke tahun, dengan tahun 2020 memiliki jumlah tertinggi dan tahun 2019 serta 2021 memiliki jumlah terendah. Sebaran artikel untuk periode waktu tertentu juga ditampilkan, yaitu sebesar 7 artikel pada tahun 2017, sebesar 2 artikel pada tahun 2018, dan sebesar 3 artikel pada tahun 2022. Variasi tahunan dalam jumlah artikel mencerminkan variasi dalam publikasi penelitian.

A. Konsep Biologi yang Berhubungan

Konsep biologi yang sering digunakan dengan melibatkan *citizen science* yaitu materi keanekaragaman hayati atau biodiversitas. Persebaran materi yang ditemukan dalam analisis artikel dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsep Biologi dalam melibatkan CS

| No | Konsep Biologi | Jumlah | Penulis |
|----|-----------------------|--------|---|
| 1 | Biodiversitas | 9 | Aivelo & Huovelin, 2020; Ballard <i>et al.</i> , 2017; Kelemen-Finan <i>et al.</i> , 2018; Mitchell <i>et al.</i> , 2017; Peter <i>et al.</i> , 2021; Phillips <i>et al.</i> , 2018; Schneiderhan-Opel & Bogner, 2020; Stylinski <i>et al.</i> , 2020; Torres <i>et al.</i> , 2023. |
| 2 | Pencemaran lingkungan | 2 | Brockhage <i>et al.</i> , 2022; Fujiwara <i>et al.</i> , 2019. |
| 3 | Konservasi | 2 | Ballard, Dixon, <i>et al.</i> , 2017; Newman <i>et al.</i> , 2017. |
| 4 | Ekologi | 1 | Greving <i>et al.</i> , 2022. |
| 5 | Perubahan Iklim | 1 | Roche <i>et al.</i> , 2020. |
| 6 | Bakteri | 1 | Lemon <i>et al.</i> , 2020. |

Hasil literatur review dari 16 artikel ditemukan konsep biologi yang diintegrasikan dengan *citizen science*. Hasil analisis ditemukan bahwa konsep biologi yang paling sering digunakan yaitu keanekaragaman hayati. Hal ini karena pada negara-negara maju menggunakan *citizen science* sebagai pengumpul data sehingga memudahkan peneliti dalam mengidentifikasi baik tumbuhan maupun hewan yang ada di daerah tersebut. Kemudian disusul dengan konsep tentang pencemaran lingkungan. Materi ini sangat sering digunakan oleh peneliti dalam menyelesaikan masalah lingkungan. Biasanya, *citizen science* diminta untuk mengumpulkan data dan mengajak

masyarakat sekitar untuk mengurangi kerusakan lingkungan yang terjadi. Hal tersebut sangat membantu meningkatkan kepedulian terhadap lingkungan. Kehadiran *citizen science* ini sangat membantu peneliti dalam menghemat waktu penelitian serta biaya. Kondisi tersebut memberi harapan untuk Indonesia yang memiliki jumlah penduduk yang tinggi untuk ikut membantu dalam dunia pendidikan maupun dalam menyelesaikan isu global.

Hasil analisis didapatkan bahwa konsep biologi yang paling banyak digunakan dalam melibatkan *citizen science* dalam penelitian yaitu pada konsep keanekaragaman hayati. Hal ini mencakup hewan invertebrata, vertebrata, dan tumbuhan tingkat tinggi. Tidak ditemukan artikel yang membahas tentang pelibatan CS dalam inventarisasi lumut, paku, dan alga. Hal ini menjadi peluang penelitian ke depan baik dalam penelitian sains maupun dalam pendidikan. Pada beberapa artikel juga mengungkapkan bahwa keterlibatan *citizen science* sangat membantu dalam mengurangi pencemaran lingkungan serta sangat membantu konservasi, salah satu contohnya dalam mengatasi masalah pencemaran air di Amerika dan Jepang (Fujiwara *et al.*, 2019) dan pencemaran nitrogen di Jerman (Brockhage *et al.*, 2022). Hal lain yang diungkapkan bahwa pelibatan *citizen science* juga dapat digunakan pada materi hidrologi, ekologi, perubahan iklim, dan bakteri. Hasil temuan lain yaitu berupa keberhasilan *citizen science* pada dunia penelitian identifikasi bakteri melalui arthropoda dan dijadikan sebagai media pembelajaran biologi (Lemon *et al.*, 2020). CS memberi peluang kepada dunia pendidikan untuk diterapkan di kelas formal oleh guru kepada peserta didik dengan materi-materi yang pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Salah satu keunikan penelitian CS dalam pendidikan yaitu keterlibatan ahli dalam pembelajaran dan *sharing* informasi.

B. Inovasi Citizen Science dalam Pendidikan

Inovasi adalah hasil pembaharuan dari yang sebelumnya baik berupa metode, media, pendekatan, teknologi, maupun kreasi pembelajaran (Ridwan dkk, 2021). Hasil penelitian yang dilakukan dapat diungkapkan bahwa *Citizen Science* memiliki potensi yang sangat besar dalam

dunia pendidikan khususnya dalam proses pembelajaran. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa penelitian yang mengungkapkan bahwa *Citizen Science* dapat meningkatkan kognitif, psikomotor, dan afektif peserta didik. Banyak *framework* yang dikemukakan oleh peneliti untuk mengevaluasi hasil belajar dengan melibatkan CS dalam proses pembelajaran. Salah satu *framework* yang representatif dapat dilihat pada *framework* yang dikemukakan oleh Phillips *et al.* (2018) dalam penelitian terbarunya terkait *Citizen Science*. Disamping itu, baru satu panduan yang telah dikembangkan mengenai penelitian dengan pelibatan CS (Aripin, I., Hidayat, T., & Rustaman, 2020; Muaziyah *et al.*, 2023). Panduan tersebut dapat digunakan untuk mengukur literasi biodiversitas dan keterampilan meneliti (Aripin, 2022). Hal ini masih sangat terbatas dilakukan, sehingga penelitian mengenai CS dalam pendidikan sangat penting untuk diimplementasikan di Indonesia. Sehingga ini mampu menjadi sebuah terobosan baru dalam dunia pendidikan. Salah satu *framework* penilaian CS yang dapat diukur dalam pembelajaran dapat dilihat pada Gambar 3. *Framework* ini dapat menjadi pedoman bagi guru di sekolah dalam mengaplikasikan dalam dunia pendidikan khususnya dalam pembelajaran siswa di kelas. *Framework* ini sangat membantu guru dalam mencari keterampilan apa saja yang dapat dilatihkan dan ditingkatkan melalui pelibatan CS dalam pembelajaran biologi.



Gambar 3. Hasil Belajar yang dapat Diukur dengan Pelibatan CS

Biasanya peneliti hanya menggunakan panduan dari ISE (*Informal Science Education*) dan LSIE (*Learning, Science, Informal Environment*). Hasil penelitian ini mengungkapkan sebuah framework yang dapat digunakan dalam evaluasi hasil belajar yang dikemukakan oleh Phillips et al pada Tahun 2018. Hasil tersebut memberikan pencerahan kepada semua guru untuk melakukan pembelajaran dengan melibatkan *citizen science*. Pada penelitian lain juga menerangkan bahwa salah satu tantangannya adalah penggunaan teknologi. Hadirnya teknologi memberikan perubahan yang sangat besar dalam tatanan kehidupan manusia. Tapi, juga menuntut manusia untuk terus mempelajarinya agar tidak ketinggalan zaman. Hal tersebut tidak hanya menjadi tantangan tapi sekaligus peluang untuk melatih kemampuan peserta didik dalam menggunakan teknologi (Roche et al., 2020). Hadirnya CS dalam dunia pendidikan mendorong para peserta untuk lebih update dengan perkembangan teknologi. Hal tersebut karena salah satu ciri CS yaitu adanya *sharing knowledge* pada dunia digital (Aripin, I., Hidayat, T., & Rustaman, 2020; Aripin, I., Hidayat, T., Rustaman, N., & Riandi, 2021; Aripin, 2022; Aripin & Hidayat, 2020). *Citizen science* tidak hanya membantu pengumpul data dalam ilmu pengetahuan namun juga sebagai alat pendidikan inovatif (Schneiderhan & Bogner, 2020). Sehingga ini memberi peluang sebagai alat pendidikan yang dapat meningkatkan kemampuan kreatif yang dapat membuat sesuatu yang inovatif melalui pembelajaran yang inovatif. Berikut ini delapan komponen *Citizen Science* dalam pembelajaran yaitu kesadaran konteks, keterlibatan warga/masyarakat, memanfaatkan infrastruktur, inovasi teknologi, inovasi pendidikan, jangkauan dan skala, membangun jaringan dan pemikiran yang kompleks (Sanabria-Z et al., 2022).

C. Sumber Belajar dan Model yang Digunakan dalam Pelibatan CS

Sumber belajar yang dimaksud dalam kategori ini yaitu segala bahan yang digunakan untuk membantu pembelajaran dengan pelibatan CS. Sedangkan, Model adalah tahapan yang digunakan guru dengan pelibatan CS (Ridwan dkk, 2021). Hasil analisis 16 artikel yang dilakukan

dapat dikemukakan bahwa sumber belajar yang sering digunakan dalam penelitian *citizen science* yaitu media digital. Pada beberapa penelitian menggunakan *website citizen science* dalam melakukan penelitian (Phillips et al., 2018). Hal ini identik dengan penerapan *citizen science* yang tidak lepas dengan media informasi sebagai sarana untuk berbagi ilmu pengetahuan yang diperoleh di lapangan. Sehingga, apabila ingin melakukan penelitian CS, penggunaan media menjadi bahan pertimbangan utama.

Model pembelajaran yang sering digunakan dalam melibatkan *citizen science* yaitu *project-based learning* dengan kolaborasi global (Fujiwara et al., 2019). Beberapa hasil penelitian mengungkapkan bahwa *project-based learning* ini sangat mendukung terlaksananya pembelajaran dengan melibatkan *citizen science* dalam proses pembelajaran. Model lain yang mendukung terlaksananya pembelajaran dengan melibatkan *citizen science* yaitu model inkuiri. Model pembelajaran inkuiri adalah pembelajaran yang menekankan pada proses berpikir secara analisis untuk mencari dan menemukan sendiri jawaban dari suatu masalah (Taofiq, M., Setiadi, D., & Hadiprayitno, 2018). Pada hal tersebut diharapkan peserta didik untuk melakukan eksperimen sendiri guna mencari dan menyelidiki secara sistematis, kritis, logis, dan analitis menggunakan macam-macam sumber informasi dan gagasan untuk meningkatkan pemahaman (Kelana & Wardani, 2021; Suparmi, 2018). Penggunaan model ini biasanya digunakan guru pada materi pencemaran lingkungan. Hal tersebut didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya yang mengungkapkan bahwa model inkuiri sangat mendukung keterlibatan *citizen science* dalam proses pembelajaran (Phillips et al., 2018; Styliniski et al., 2020). Oleh karena itu, model tersebut dapat menjadi salah satu bahan pertimbangan oleh guru untuk digunakan.

D. Hubungan *Citizen Science Project* untuk Melatihkan Keterampilan Abad 21

Keterampilan 21 yang menjadi target dalam penelitian ini yaitu keterampilan komunikasi, kolaborasi, berpikir kritis, dan berpikir kreatif. Penelitian ini juga menyoroti kognitif, afektif, dan psikomotor lain yang dapat dilatihkan dalam artikel

yang dianalisis. Kemampuan peserta didik yang paling meningkat yaitu kolaborasi dan komunikasi (Phillips *et al.*, 2018). Hal ini dipengaruhi dari proses pelibatan *citizen science* peserta didik didorong untuk berkolaborasi dengan masyarakat maupun teman sebayanya. Selain itu, peserta juga dituntut untuk mampu mengkomunikasikan informasi yang diperoleh di lapangan. Hal ini tentu akan menstimulus kemampuan komunikasi peserta didik. Tidak hanya 2 kemampuan itu ternyata *citizen science* mampu meningkatkan kemampuan kreatif dan berpikir kritis, meskipun hasil persentasenya tidak sebesar kolaborasi dan komunikasi. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *citizen science* memiliki hubungan dalam meningkatkan keterampilan abad 21.

Kemampuan lain yang diluar keterampilan abad 21 yang meningkat seperti pengetahuan sains, pengumpul data, ketertarikan dalam belajar, motivasi, self-efficacy, kesadaran lingkungan, dan kesadaran terhadap hewan. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa *citizen science* mampu mengubah pikiran negatif masyarakat terhadap hewan-hewan yang dianggap menjijikan seperti tikus dan kelelawar (Aivelo & Huovelin, 2020; Greving *et al.*, 2022). Pada beberapa artikel mengungkapkan lebih dari 1 keterampilan yang dapat dilatihkan. Hasil kemampuan peserta didik yang mengalami peningkatan dari 16 artikel yang telah dianalisis dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kemampuan yang meningkat dengan melibatkan *Citizen Science*

| No | Keterampilan | Jumlah | Persentase |
|----|----------------------------|--------|------------|
| 1 | Kolaborasi | 16 | 100 % |
| 2 | Komunikasi | 16 | 100 % |
| 3 | Mengumpulkan data | 16 | 100 % |
| 4 | Pengetahuan sains | 14 | 87,5 % |
| 5 | Kesadaran lingkungan | 13 | 81,25 % |
| 6 | Ketertarikan dalam belajar | 12 | 75 % |
| 7 | Keterampilan proses sains | 11 | 68,75 % |
| 8 | Kreatif | 10 | 62,5 % |
| 9 | Motivasi Belajar | 10 | 62,5 % |
| 10 | Berpikir Kritis | 9 | 56,25 % |
| 11 | Self-efficacy | 1 | 6,25 % |
| 12 | Kesadaran terhadap hewan | 1 | 6,25 % |

Keterampilan dengan peningkatan signifikan dikarenakan pada saat pengambilan data dilapangan peserta dituntut untuk mampu berkolaborasi dengan masyarakat maupun kelompok kerja serta dituntut untuk mampu berkomunikasi sehingga informasi yang ingin didapatkan dapat diperoleh dengan baik (Bonney *et al.*, 2016; Mashudi, 2021). Sebagai salah satu alat pendidikan inovatif hal itu tentu mendorong kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik baik dalam menyelesaikan masalah lingkungan maupun dalam pengumpulan data serta pelaporan data kepada guru dengan bentuk yang kreatif sehingga dapat menarik pembaca (Schneiderhan & Bogner, 2020). Sehingga dapat dikatakan bahwa *citizen science* salah satu alternatif yang dapat digunakan guru dalam melatih keterampilan abad 21 peserta didik.

E. Pembelajaran Biologi Berbasis *Citizen Science*

Pembelajaran biologi berbasis *citizen science* biasanya dilaksanakan dalam bentuk proyek kegiatan yang dilaksanakan oleh peserta didik dengan melibatkan ahli dan masyarakat publik. Hasil temuan yang diperoleh oleh peserta didik dilakukan publikasi melalui aplikasi seperti Instagram, facebook, plantnet dan lainnya. Disamping itu, juga dilakukan melalui *citizenscience.org* (Phillips *et al.*, 2018). Hal tersebut bertujuan untuk berbagi informasi yang diperoleh. Beberapa negara maju seperti Jepang sudah biasa menerapkan ini dalam pembelajaran pada bidang masalah lingkungan (Fujiwara *et al.*, 2019). Pembelajaran tidak hanya berupa konten (pengetahuan) tapi mengajarkan peserta didik untuk peduli dan menjaga. Sehingga, pembelajaran lebih bermakna dan berkesan untuk peserta didik. Awal perkembangan CS, hanya digunakan untuk membantu peneliti dalam mengumpulkan data penelitian saja. Seiring dengan perkembangan riset, ditemukan bahwa CS mampu mendukung pembelajaran di sekolah dan menjadikan sekolah sebagai agen yang dapat berkontribusi dalam data penelitian.

Komponen yang menjadi karakteristik dari CS yaitu kesadaran konteks, keterlibatan warga atau masyarakat, memanfaatkan infrastruktur, inovasi teknologi, inovasi pendidikan, jangkauan

dan skala, membangun jaringan, dan pemikiran yang kompleks (Sanabria-Z *et al.*, 2022). Komponen tersebut menjadi penting ada dalam pembelajaran biologi berbasis CS. CS memiliki peran menjadi 3 kategori yaitu kontributor (*contributory project*), kolaboratif (*collaborative project*), dan pembuatan proyek bersama (*co-creataed*) (Bonney, Cooper, *et al.*, 2016). Disamping itu, ahli CS lainnya membagi menjadi 4 tingkatan diantaranya level 1 sebagai sumber informasi (*crowdsourcing*), level 2 sebagai memberikan penerjemah dan menjadi sukarelawan dalam membantu berpikir (*distributed intelligences*), level 3 sebagai partisipan sains yang membantu dalam mengumpulkan data penelitian serta mendefinisikan masalah (*parcipatory science*), dan level 4 sebagai kolaborasi sains, mengumpulkan data dan analisis data (*extreme citizen science*) (Haklay, 2012). Hal tersebut menjadi pertimbangan dalam merancang CS dalam pembelajaran biologi.

PENUTUP

Citizen science telah berkontribusi besar dalam pengumpulan data penelitian terutama dalam identifikasi keanekaragaman hayati. Saat ini, citizen science juga digunakan dalam dunia pendidikan karena terbukti meningkatkan keterampilan yang diharapkan dimiliki oleh peserta didik di sekolah. Hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil bahwa keterampilan yang dapat meningkatkan dengan mengintegrasikan citizen science dalam proses pembelajaran diantaranya komunikasi, kolaborasi, berpikir kritis, berpikir kreatif. Disamping keterampilan abad 21. Pada pembelajaran citizen science dapat diikuti dengan penerapan model inkuiri, project-based learning dengan kolaborasi global. Konsep biologi yang menggunakan citizen science diantaranya keanekaragaman hayati, hewan invertebrate, hewan vertebrata, hidrologi, ekologi, kerusakan lingkungan, bakteri, perubahan iklim, dan tumbuhan tingkat tinggi. Citizen science memberikan peluang sangat besar untuk diterapkan dalam proses pembelajaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2022). The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture
- 4.0. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100042.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>
- Aivelo, T., & Huovelin, S. (2020). Combining formal education and citizen science: a case study on students' perceptions of learning and interest in an urban rat project. *Environmental Education Research*, 26(3), 324–340.
<https://doi.org/10.1080/13504622.2020.1727860>*
- Aliyah, U., & Mulawarman, M. (2020). Kajian Systematic Literature Review (SLR) Untuk Mengidentifikasi Dampak Terorisme, Layanan Konseling dan Terapi Trauma Pada Anak-Anak. *ISLAMIC COUNSELING Jurnal Bimbingan Konseling Islam*, 4(2), 209. <https://doi.org/10.29240/jbk.v4i2.1759>
- Aripin, I., & Hidayat, T. (2020). *Public perception in Majalengka (Indonesia) toward citizen science concept*.
- Aripin, I., Hidayat, T., & Rustaman, N. (2020). *Panduan Dasar Riset Biodiversitas Berbasis Citizen Science Project*. Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia.
- Aripin, I., Hidayat, T., & Rustaman, N. (2021). Online Citizen Science untuk Penelitian dan Pengumpulan Data Biodiversitas di Indonesia. 288–298.
- Aripin, I., Hidayat, T., Rustaman, N., & Riandi, R. (2021). Pengembangan Program Perkuliahan Biologi Konservasi Berbasis Citizen Science Project. *Pedagogi Hayati*, 5(1), 1–9.
- Aripin, I. (2022). Pengembangan Program Perkuliahan Biologi Konservasi Berbasis Citizen Science Project untuk Meningkatkan Literasi Biodiversitas dan Keterampilan Meneliti Mahasiswa Calon Guru Biologi (*Doctoral dissertation, Universitas Pendidikan Indonesia*). 25–30.
- Aripin, I., & Hidayat, T. (2020). Public perception in Majalengka (Indonesia) toward citizen science concept. *Journal of Physics: Conference Series*, 1521(4), 042095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1521/4/042095>
- Ballard, H. L., Dixon, C. G. H., & Harris, E. M. (2017). Youth-focused citizen science: Examining the role of environmental science learning and agency for conservation. *Biological Conservation*, 208,

- 65–75.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.024>*
- Ballard, H. L., Robinson, L. D., Young, A. N., Pauly, G. B., Higgins, L. M., Johnson, R. F., & Tweddle, J. C. (2017). Contributions to conservation outcomes by natural history museum-led citizen science: Examining evidence and next steps. *Biological Conservation*, 208, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.040>*
- Bela, G., Peltola, T., Young, J. C., Balázs, B., Arpin, I., Pataki, G., Hauck, J., Kelemen, E., Kopperoinen, L., Van Herzele, A., Keune, H., Hecker, S., Suškevičs, M., Roy, H. E., Itkonen, P., Külvik, M., László, M., Basnou, C., Pino, J., & Bonn, A. (2016). Learning and the transformative potential of citizen science. *Conservation Biology*, 30(5), 990–999. <https://doi.org/10.1111/cobi.12762>
- Bonney, R., Cooper, C., & Ballard, H. (2016). The Theory and Practice of Citizen Science: Launching a New Journal. *Citizen Science: Theory and Practice*, 1(1), 1. <https://doi.org/10.5334/cstp.65>
- Bonney, R., Phillips, T. B., Ballard, H. L., & Enck, J. W. (2016). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, 25(1), 2–16. <https://doi.org/10.1177/0963662515607406>
- Brockhage, F., Lüsse, M., Klasmeier, J., Pietzner, V., & Beeken, M. (2022). Citizen Science as an Innovative Approach to Analyze Spatial and Temporal Influences on Nitrate Pollution of Water Bodies: Results of a Participatory Research Project in Germany. *Sustainability*, 14(15), 9516. <https://doi.org/10.3390/su14159516>*
- Chandler, M., See, L., Copas, K., Bonde, A. M. Z., López, B. C., Danielsen, F., Legind, J. K., Masinde, S., Miller-Rushing, A. J., Newman, G., Rosemartin, A., & Turak, E. (2017). Contribution of citizen science towards international biodiversity monitoring. *Biological Conservation*, 213, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.09.004>
- Cooper, C. B., Dickinson, J., Phillips, T., & Bonney, R. (2007). Citizen science as a tool for conservation in residential ecosystems. *Ecology and Society*, 2(12), 11.
- Cornwell, M. L., & Campbell, L. M. (2012). Co-producing conservation and knowledge: Citizen-based sea turtle monitoring in North Carolina, USA. *Social Studies of Science*, 42(1), 101–120. <https://doi.org/10.1177/0306312711430440>
- Damayanti, D. F., Solihat, R., & Hidayat, T. (2021). Upaya meningkatkan research skill siswa melalui citizen science project pada pembelajaran biologi SMA. *BIOEDUKASI (Jurnal Pendidikan Biologi)*, 12(2), 133–140.
- Fernandez-Gimenez, M. E., Ballard, H. L., & Sturtevant, V. E. (2008). Adaptive Management and Social Learning in Collaborative and Community-Based Monitoring: a Study of Five Community-Based Forestry Organizations in the western USA. *Ecology and Society*, 13(2), art4. <https://doi.org/10.5751/ES-02400-130204>
- Fujiwara, Y., Hite, R., Wygant, H., & Paulsen, S. (2019). Engaging Students in Global Citizen Science: A U.S.-Japan collaborative watershed project. *Childhood Education*, 95(2), 53–59. <https://doi.org/10.1080/00094056.2019.1593761>*
- Greving, H., Bruckermann, T., Schumann, A., Straka, T. M., Lewanzik, D., Voigt-Heucke, S. L., Marggraf, L., Lorenz, J., Brandt, M., Voigt, C. C., Harms, U., & Kimmerle, J. (2022). Improving attitudes and knowledge in a citizen science project about urban bat ecology. *Ecology and Society*, 27(2), art24. <https://doi.org/10.5751/ES-13272-270224>*
- Haklay, M. (2012). Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation. *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, 105–122.
- Heigl, F., Kieslinger, B., Paul, K. T., Uhlik, J., & Dörler, D. (2019). *Toward an international definition of citizen science*. 8089–8092.
- Jordan, R. C., Ballard, H. L., & Phillips, T. B. (2012). Key issues and new approaches for evaluating citizen-science learning outcomes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(6), 307–309. <https://doi.org/10.1890/110280>

- Kelana, J. B., & Wardani, D. S. (2021). *model pembelajaran IPA SD*. Edutrimedia Indonesia.
- Kelemen-Finan, J., Scheuch, M., & Winter, S. (2018). Contributions from citizen science to science education: an examination of a biodiversity citizen science project with schools in Central Europe. *International Journal of Science Education*, *40*(17), 2078–2098. <https://doi.org/10.1080/09500693.2018.1520405>*
- Krasny, M. E., & Bonney, R. (2005). *Environmental education through citizen science and participatory action research*. Cambridge University Press.
- Lemon, A., Bordenstein, S. R., & Bordenstein, S. R. (2020). Discover the Microbes Within! The Wolbachia Project: Citizen Science and Student-Based Discoveries for 15 Years and Counting. *Genetics*, *216*(2), 263–268. <https://doi.org/10.1534/genetics.120.303649>*
- Lewandowski, E. J., & Oberhauser, K. S. (2017). Butterfly citizen scientists in the United States increase their engagement in conservation. *Biological Conservation*, *208*, 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.07.029>
- Mashudi, M. (2021). Pembelajaran Modern Membekali Peserta Didik Keterampilan Abad Ke-21_Jurnal Mashudi. *Al-Mudarris: Jurnal Ilmiah Pendidikan Islam*, *4*(1), 93–114.
- Mastan, I. A., Sensuse, D. I., Suryono, R. R., & Kautsarina, K. (2022). Evaluation Of Distance Learning System (E-Learning): A Systematic Literature Review. *Jurnal Teknoinfo*, *16*(1), 132. <https://doi.org/10.33365/jti.v16i1.1736>
- McKinley, D. C., Miller-Rushing, A. J., Ballard, H. L., Bonney, R., Brown, H., Cook-Patton, S. C., Evans, D. M., French, R. A., Parrish, J. K., Phillips, T. B., Ryan, S. F., Shanley, L. A., Shirk, J. L., Stepenuck, K. F., Weltzin, J. F., Wiggins, A., Boyle, O. D., Briggs, R. D., Chapin, S. F., ... Soukup, M. A. (2017). Citizen science can improve conservation science, natural resource management, and environmental protection. *Biological Conservation*, *208*, 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.05.015>
- Miller-Rushing, A., Primack, R., & Bonney, R. (2012). The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *10*(6), 285–290. <https://doi.org/10.1890/110278>
- Mitchell, N., Triska, M., Liberatore, A., Ashcroft, L., Weatherill, R., & Longnecker, N. (2017). Benefits and challenges of incorporating citizen science into university education. *PLOS ONE*, *12*(11), e0186285. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186285>*
- Muaziyah, S. E. S., Hidayat, T., Sriyati, S., & Lutianasari, L. (2023). Citizen Science Project, Weather-it, in Science Education: The Scientific Attitudes of Junior High School Students. *Techno Jurnal Penelitian*, *12*(1), 28–38. <https://doi.org/10.33387/tjp.v12i1.5844>
- Newman, G., Chandler, M., Clyde, M., McGreavy, B., Haklay, M., Ballard, H., Gray, S., Scarpino, R., Hauptfeld, R., Mellor, D., & Gallo, J. (2017). Leveraging the power of place in citizen science for effective conservation decision making. *Biological Conservation*, *208*, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.019>*
- Nuraini, N. (2017). Profil Keterampilan Berpikir Kritis Mahasiswa Calon Guru Biologi Sebagai Upaya Mempersiapkan Generasi Abad 21. *DIDAKTIKA BIOLOGI: Jurnal Penelitian Pendidikan Biologi*, *1*(2), 89–96.
- Peter, M., Diekötter, T., Kremer, K., & Höffler, T. (2021). Citizen science project characteristics: Connection to participants' gains in knowledge and skills. *PLOS ONE*, *16*(7), e0253692. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253692>*
- Phillips, T., Porticella, N., Constan, M., & Bonney, R. (2018). A Framework for Articulating and Measuring Individual Learning Outcomes from Participation in Citizen Science. *Citizen Science: Theory and Practice*, *3*(2), 3. <https://doi.org/10.5334/cstp.126>*
- Ridwan, Y. H., Zuhdi, M., Kosim, K., & Sahidu, H. (2021). Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Model

- Problem Based Learning Untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kreatif Fisika Peserta Didik. *ORBITA: Jurnal Kajian, Inovasi Dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, 7(1), 103–108.
- Rifa Hanifa Mardhiyah, Sekar Nurul Fajriyah Aldriani, Febyana Chitta, & Muhamad Rizal Zulfikar. (2021). Pentingnya Keterampilan Belajar di Abad 21 sebagai Tuntutan dalam Pengembangan Sumber Daya Manusia. *Lectura : Jurnal Pendidikan*, 12(1), 29–40. <https://doi.org/10.31849/lectura.v12i1.5813>
- Roche, J., Bell, L., Galvão, C., Golumbic, Y. N., Kloetzer, L., Knobens, N., Laakso, M., Lorke, J., Mannion, G., Massetti, L., Mauchline, A., Pata, K., Ruck, A., Taraba, P., & Winter, S. (2020). Citizen Science, Education, and Learning: Challenges and Opportunities. *Frontiers in Sociology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2020.613814>*
- Sanabria-Z, J. C., Molina Espinosa, J. M., Alfaro Ponce, B., & Vycudilíková Outlá, M. (2022). A Threshold for Citizen Science Projects: Complex Thinking as a Driver of Holistic Development. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 25(2). <https://doi.org/10.5944/ried.25.2.33052>
- Schneiderhan-Opel, J., & Bogner, F. X. (2020). How fascination for biology is associated with students' learning in a biodiversity citizen science project. *Studies in Educational Evaluation*, 66, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100892>*
- Shirk, J. L., Ballard, H. L., Wilderman, C. C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B. V., Krasny, M. E., & Bonney, R. (2012). Public Participation in Scientific Research: a Framework for Deliberate Design. *Ecology and Society*, 17(2), art29. <https://doi.org/10.5751/ES-04705-170229>
- Stylinski, C. D., Peterman, K., Phillips, T., Linhart, J., & Becker-Klein, R. (2020). Assessing science inquiry skills of citizen science volunteers: a snapshot of the field. *International Journal of Science Education, Part B*, 10(1), 77–92. <https://doi.org/10.1080/21548455.2020.1719288>*
- Suhartono, E. (2017). Systematic Literatur Review (SLR): Metode, Manfaat, Dan Tantangan Learning Analytics Dengan Metode Data Mining di Dunia Pendidikan Tinggi. *Jurnal Ilmiah INFOKAM*, 13(1).
- Suparmi, N. W. (2018). Hasil Belajar Pemahaman Konsep Dan Berpikir Kreatif Siswa Dalam Pembelajaran Inkuiri Bebas Dan Inkuiri Terbimbing. *Journal of Education Technology*, 2(4), 192–196.
- Suryadi, A., Purwaningsih, E., Yuliati, L., & Koes-Handayanto, Supriyono. (2023). STEM teacher professional development in pre-service teacher education: A literature review. *Waikato Journal of Education*, 28(1). <https://doi.org/10.15663/wje.v28i1.1063>
- Suryana, C., & Iskandar, S. (2022). Kepemimpinan Kepala Sekolah dalam Menerapkan Konsep Merdeka Belajar di Sekolah Dasar. *Jurnal Basicedu*, 6(4), 7317–7326. <https://doi.org/10.31004/basicedu.v6i4.3485>
- Taofiq, M., Setiadi, D., & Hadiprayitno, G. (2018). Analisis implementasi model pembelajaran inkuiri dan problem-based learning terhadap kemampuan literasi sains biologi ditinjau dari kemampuan akademik yang berbeda di SMAN 1 Kayangan. In *Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi*.
- Toomey, A. H., & Domroese, M. C. (2013). Can citizen science lead to positive conservation attitudes and behaviors? *Can Citizen Science Lead to Positive Conservation Attitudes and Behaviors?*, 20(1), 50–62.
- Torres, A.-C., Bedessem, B., Deguines, N., & Fontaine, C. (2023). Online data sharing with virtual social interactions favor scientific and educational successes in a biodiversity citizen science project. *Journal of Responsible Innovation*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/23299460.2021.2019970>*
- Trautmann, N. M., Shirk, J. L., Fee, J., & Krasny, M. E. (2012). Who Poses the Question? In *Citizen Science* (pp. 179–190). Cornell University Press. <https://doi.org/10.7591/cornell/9780801449116.003.0013>
- Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Werla Putra, G., & Iswara, B. (2019). Metode Systematic Literature Review untuk Identifikasi Platform dan Metode

Pengembangan Sistem Informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, 1(2), 63. <https://doi.org/10.24002/ijis.v1i2.1916>

Trumbull, D. J., Bonney, R., & Grudens-Schuck, N. (2005). Developing materials to promote inquiry: Lessons learned. *Science Education*, 89(6), 879–900. <https://doi.org/10.1002/sce.20081>