

## **TRANSFORMASI LITERASI SAINS MELALUI SIMULASI LANGIT DIGITAL: STUDI PADA MAHASISWA PENDIDIKAN GURU SEKOLAH DASAR**

Golden R.S.C Ayomi<sup>1</sup>, Aisyah Ali <sup>2</sup>, Sarah Ohee<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Elementary School Teacher Education,

Faculty of Teacher Training and Education, Universitas Cenderawasih,

<sup>1</sup>goldenayomi@gmail.com, <sup>2</sup>aisyahali@fkip.uncen.ac.id, <sup>3</sup>samarlina53@gmail.com

### **ABSTRACT**

*Scientific literacy is an essential competency for prospective elementary school teachers in designing meaningful learning experiences based on scientific reasoning. However, many PGSD students still experience difficulties in explaining scientific phenomena, assessing investigation designs, and interpreting data or evidence, especially on astronomical topics that are abstract and prone to misconceptions. This study aims to evaluate the effectiveness of using the planetarium software Stellarium in improving students' scientific literacy on the topics of Earth's rotation, revolution, and lunar phases. The method used was a quasi-experimental pretest–posttest design in two whole-class groups, where the experimental group received dynamic visual simulation-based learning using Stellarium, and the control group followed conventional learning. The results showed that the experimental group had significantly higher scientific literacy scores than the control group (mean 74.49 vs. 64.84;  $p = 0.010$ ;  $g \approx 1.23$ ). The strongest effects occurred in the subprocesses of “explaining phenomena” ( $g \approx 1.42$ ) and “interpreting data/evidence” ( $g \approx 1.50$ ), while “assessing/designing investigations” showed moderate improvement ( $g \approx 0.76$ ). Qualitative data from reflections and interviews confirmed a conceptual shift from common misconceptions (e.g., the causes of seasons or lunar phases) to a coherent, model-based understanding evidenced by visualizations from the simulation. These findings suggest that the use of Stellarium not only improved conceptual accuracy but also strengthened students' ability to connect observations, models, and evidence to explain astronomical phenomena. This study concludes that visual simulation-based learning such as Stellarium is effective in improving the scientific literacy of elementary school teacher (PGSD) students. Implications include the need for systematic integration of evidence-based digital media into the Earth and Space Science curriculum to address misconceptions and strengthen prospective teachers' scientific reasoning skills.*

*Keywords: scientific literacy, Stellarium, PGSD students, astronomy learning, visual simulation*

## ABSTRAK

Literasi sains merupakan kompetensi esensial bagi calon guru sekolah dasar dalam mendesain pengalaman belajar yang bermakna dan berbasis penalaran ilmiah. Namun, banyak mahasiswa PGSD masih mengalami kesulitan dalam menjelaskan fenomena ilmiah, menilai rancangan penyelidikan, serta menafsirkan data atau bukti, terutama pada topik-topik astronomi yang bersifat abstrak dan rentan miskonsepsi. Studi ini bertujuan mengevaluasi efektivitas penggunaan perangkat lunak planetarium *Stellarium* dalam meningkatkan literasi sains mahasiswa pada topik rotasi, revolusi Bumi, dan fase Bulan. Metode yang digunakan adalah kuasi-eksperimen dengan desain pretest–posttest pada dua kelompok kelas utuh, di mana kelompok eksperimen memperoleh pembelajaran berbasis simulasi visual dinamis menggunakan *Stellarium*, dan kelompok kontrol mengikuti pembelajaran konvensional. Hasil menunjukkan bahwa kelompok eksperimen secara signifikan memiliki skor literasi sains yang lebih tinggi dibanding kelompok kontrol (mean 74,49 vs 64,84;  $p = 0,010$ ;  $g \approx 1,23$ ). Efek paling kuat terjadi pada subproses “menjelaskan fenomena” ( $g \approx 1,42$ ) dan “menafsirkan data/bukti” ( $g \approx 1,50$ ), sedangkan “menilai/merancang penyelidikan” menunjukkan peningkatan moderat ( $g \approx 0,76$ ). Data kualitatif dari refleksi dan wawancara mengonfirmasi pergeseran konseptual dari miskonsepsi umum (misalnya, penyebab musim atau fase Bulan) menuju pemahaman berbasis model ilmiah yang koheren dan dibuktikan dengan visualisasi dari simulasi. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan *Stellarium* tidak hanya meningkatkan akurasi konsep, tetapi juga memperkuat kemampuan mahasiswa untuk menghubungkan observasi, model, dan bukti dalam menjelaskan fenomena astronomi. Studi ini menyimpulkan bahwa pembelajaran berbasis simulasi visual seperti *Stellarium* efektif dalam meningkatkan literasi sains mahasiswa PGSD. Implikasinya mencakup perlunya integrasi sistematis media digital berbasis bukti ke dalam kurikulum Ilmu Bumi dan Antariksa untuk menekan miskonsepsi dan memperkuat keterampilan penalaran ilmiah calon guru.

Kata kunci: literasi sains, stellarium, mahasiswa PGSD, pembelajaran astronomi, simulasi visual

## **A. Pendahuluan**

Literasi sains pada calon guru sekolah dasar merupakan landasan strategis bagi terciptanya pengalaman belajar sains yang bermakna di tingkat dasar. Dalam kerangka kontemporer, literasi sains tidak direduksi menjadi hafalan fakta, melainkan mencakup kemampuan menjelaskan fenomena secara ilmiah, mengevaluasi atau merancang penyelidikan, serta menafsirkan data dan bukti untuk pengambilan keputusan sehari-hari. Kapasitas ini memadukan pengetahuan konseptual, prosedural, dan epistemik sehingga memungkinkan individu menilai klaim berbasis bukti dan memahami implikasi sains dalam konteks personal, sosial, dan global. Dalam konteks pendidikan guru di Indonesia, berbagai kajian mengindikasikan bahwa literasi sains mahasiswa Pendidikan Guru Sekolah Dasar (PGSD) masih memerlukan penguatan, terutama pada ranah penalaran kausal, penggunaan bukti secara tepat, dan transfer konsep ke situasi autentik. Kesenjangan ini berdampak langsung pada kualitas pembelajaran di sekolah dasar karena guru berperan sebagai perancang

pengalaman belajar yang membangun cara berpikir ilmiah sejak dini.

Astronomi sebagai bagian dari Ilmu Bumi dan Antariksa menghadirkan tantangan khusus bagi literasi sains. Banyak konsep kunci, seperti rotasi dan revolusi Bumi, gerak semu harian dan tahunan Matahari, serta fase Bulan, bersifat abstrak dan berkarakter spasio-temporal sehingga sukar dipahami melalui penjelasan verbal atau gambar statis semata. Selain itu, miskonsepsi yang lazim—misalnya penyebab musim atau penjelasan fase Bulan—sering bersumber dari representasi yang tidak akurat atau pemisahan konsep dari fenomena yang diamati. Kondisi tersebut menuntut strategi pembelajaran yang memberi pengalaman representasional kaya, memfasilitasi manipulasi variabel waktu dan lokasi, serta mengaitkan observasi dengan penjelasan berbasis model ilmiah agar mahasiswa dapat membangun pemahaman konseptual yang koheren dan aplikatif.

Penggunaan perangkat lunak planetarium sumber terbuka seperti Stellarium diusulkan sebagai pendekatan yang selaras dengan kebutuhan tersebut. Stellarium menyediakan representasi langit malam yang akurat terhadap waktu dan lokasi pengguna, memungkinkan pengamatan

virtual atas posisi benda langit, perubahan fase Bulan, ketinggian Matahari, dan pergeseran rasi bintang lintas tanggal dan jam. Berbagai laporan penelitian menunjukkan bahwa visualisasi dan simulasi astronomi dapat membantu mengurangi miskonsepsi, memperkaya pengalaman observasional, dan meningkatkan kualitas pemahaman konseptual pada topik tata surya. Pada konteks Indonesia, studi-studi pendidikan sains yang memanfaatkan perangkat lunak astronomi juga mengindikasikan potensi peningkatan hasil belajar dan kualitas pemahaman, meski masih bervariasi dalam desain dan skala sampel. Secara teoritik, efektivitas pembelajaran berbasis simulasi dapat ditopang oleh prinsip *discovery learning* yang menekankan peran aktif peserta didik dalam menstrukturkan pengetahuan melalui eksplorasi terarah, pengujian prediksi, dan refleksi atas bukti yang diamati. Dalam kerangka literasi sains, pengalaman eksplorasi semacam ini diharapkan menumbuhkan kemampuan menjelaskan fenomena, menilai rancangan penyelidikan yang layak, serta menafsirkan data/visualisasi dengan argumentasi yang sah.

Meskipun indikasi awal menjanjikan, peta literatur memperlihatkan beberapa ruang kosong yang relevan untuk diisi. Pertama, sebagian besar kajian terdahulu tentang pemanfaatan simulasi astronomi cenderung menggunakan indikator hasil belajar kognitif umum (misalnya skor tes topik tertentu), sementara pengukuran literasi sains yang komprehensif—mencakup menjelaskan fenomena, mengevaluasi/merancang penyelidikan, dan menafsirkan data/bukti—relatif jarang digunakan sebagai kerangka operasional utama. Kedua, bukti empiris yang secara khusus berfokus pada populasi mahasiswa PGSD masih terbatas, padahal karakteristik calon guru sekolah dasar menuntut penguasaan konsep yang terintegrasi dengan kemampuan merancang pengalaman belajar sains yang kontekstual dan berbasis bukti. Ketiga, pada topik yang sarat miskonsepsi seperti penyebab musim dan fase Bulan, dibutuhkan rancangan penilaian yang tidak hanya mengukur jawaban benar, melainkan juga kualitas alasan ilmiah dan penggunaan bukti dari data simulasi/diagram untuk memastikan bahwa peningkatan skor mencerminkan pergeseran konseptual yang bermakna.

Berangkat dari kebutuhan tersebut, artikel ini memusatkan perhatian pada efektivitas penggunaan Stellarium dalam meningkatkan literasi sains mahasiswa PGSD pada topik astronomi dasar. Pendekatan ini menempatkan literasi sains sebagai variabel utama yang dioperasionalkan melalui tiga proses kompetensi: (1) menjelaskan fenomena secara ilmiah—misalnya memberikan penjelasan kausal tentang perubahan durasi siang–malam dan musim berdasarkan model rotasi–revolusi; (2) mengevaluasi atau merancang penyelidikan—misalnya menilai rancangan pengamatan virtual yang layak untuk membedakan dua hipotesis tentang fase Bulan; dan (3) menafsirkan data dan bukti ilmiah—misalnya membaca grafik ketinggian Matahari atau jejak posisi Bulan lintas tanggal untuk menyusun argumentasi yang konsisten dengan bukti. Dengan memberikan tugas-tugas berbasis skenario yang memanfaatkan fitur manipulasi waktu dan lokasi di Stellarium, diharapkan mahasiswa membangun jembatan antara observasi, representasi visual, dan penjelasan ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan (Reyes, 2013; Bruner, 1966).

Kontribusi teoretis artikel ini terletak pada pemadatan kerangka literasi sains ke dalam blueprint penilaian berbasis konteks astronomi yang menuntut integrasi pengetahuan konseptual, prosedural, dan epistemik (OECD, 2019). Alih-alih berfokus pada pengukuran fakta terisolasi, instrumen yang digunakan dirancang untuk menangkap kualitas penalaran—termasuk koherensi kausal, penggunaan model, dan justifikasi evidensial—sehingga memungkinkan pelacakan pergeseran konseptual yang lebih halus pada domain yang rentan miskonsepsi (Holbrook & Rannikmae, 2009; Bybee, 2010). Kontribusi praktisnya diarahkan pada desain pembelajaran PGSD: (a) pemilihan representasi visual yang akurat secara astronomis; (b) penahapan tugas yang mendorong peralihan dari pengamatan ke penjelasan ilmiah; serta (c) skema penilaian yang mengaitkan bukti simulasi dengan argumen yang disusun mahasiswa (Reyes, 2013; Bruner, 1966). Secara khusus, penelitian ini merumuskan pertanyaan-pertanyaan berikut untuk memandu analisis: (1) sejauh mana pembelajaran berbasis Stellarium meningkatkan literasi sains total mahasiswa PGSD pada topik astronomi dasar dibanding pembelajaran

konvensional dengan materi dan waktu yang setara; (2) pada komponen proses, sejauh mana intervensi meningkatkan kemampuan menjelaskan fenomena secara ilmiah, mengevaluasi/merancang penyelidikan, dan menafsirkan data/bukti; serta (3) pada level domain konten, sejauh mana intervensi meningkatkan akurasi dan koherensi pemahaman mahasiswa pada rotasi Bumi dan gerak semu harian, revolusi Bumi dan keterkaitan dengan musim, serta fase Bulan dan konfigurasi Matahari–Bumi–Bulan . Dengan mengartikulasikan literasi sains sebagai tujuan eksplisit dan memanfaatkan potensi representasional Stellarium, studi ini diharapkan menyumbang bukti yang dapat ditindaklanjuti untuk peningkatan kualitas pendidikan calon guru sekolah dasar.

Secara keseluruhan, urgensi penelitian ini bersifat ganda: ilmiah—mengisi kekosongan bukti mengenai efektivitas visualisasi astronomi terhadap literasi sains dalam populasi PGSD—dan praktis—memberi dasar rancangan pembelajaran yang mengintegrasikan simulasi digital untuk mengatasi abstraksi dan miskonsepsi pada topik kunci tata surya. Dengan fondasi teoretis yang jelas dan instrumen

penilaian yang diselaraskan dengan paradigma literasi sains, hasil penelitian diharapkan berkontribusi pada pengembangan kurikulum dan pedagogi sains sekolah dasar yang lebih berorientasi pada bukti dan penalaran ilmiah .

## **B. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan desain kuasi-eksperimental non-equivalent groups pretest–posttest untuk mengevaluasi efektivitas pembelajaran berbasis *Stellarium* terhadap literasi sains mahasiswa PGSD pada topik astronomi.

Partisipan terdiri atas dua kelas utuh mata kuliah “Ilmu Bumi dan Antariksa” tahun akademik 2024–2025 dengan kriteria inklusi keaktifan kuliah, kehadiran  $\geq 80\%$ , serta penyelesaian pretest–posttest. Kelompok eksperimen memperoleh pembelajaran interaktif dengan visualisasi dan simulasi menggunakan *Stellarium*, sedangkan kelompok kontrol mengikuti pembelajaran konvensional dengan ceramah dan gambar statis. Variabel utama adalah literasi sains yang mencakup kemampuan menjelaskan fenomena, menilai/merancang penyelidikan, dan menafsirkan data sesuai kerangka literasi sains

kontemporer (Fives et al., 2014b; Shaffer et al., 2019).

Instrumen literasi sains dikembangkan berdasarkan blueprint tiga domain astronomi (rotasi, revolusi, fase/konfigurasi) yang dipadukan dengan tiga proses literasi sains. Bentuk soal berupa pilihan ganda beralasan dan uraian terstruktur, dengan validitas isi dijamin melalui *expert review* dan indeks CVI (Spoto et al., 2022), serta reliabilitas internal dilaporkan melalui Cronbach's  $\alpha$  dan omega McDonald (Green & Yang, 2015). Validitas konstruk diperkuat dengan analisis Partial Credit Model, sedangkan konsistensi penilaian uraian diperiksa menggunakan Cohen's  $\kappa$  atau ICC (Cohen, 1960).

Intervensi dilaksanakan dalam tiga sesi dengan alur orientasi fenomena, eksplorasi melalui *Stellarium*, elaborasi, aplikasi kontekstual, dan refleksi, selaras dengan prinsip tugas autentik (Hand et al., 1999; Owens & Sadler, 2023).

Analisis data diawali dengan pemeriksaan kelengkapan, reliabilitas, serta validitas instrumen, kemudian efektivitas intervensi diuji menggunakan ANCOVA dengan skor pretest sebagai kovariat (Shadish et al., 2004). Ukuran efek dilaporkan dalam Hedges'  $g$  dan

parsial  $\eta^2$  (Cohen, 1988; Cohen et al., 2018). Selain itu, analisis butir dan uji DIF dilakukan untuk menjamin keadilan pengukuran antar kelompok. Seluruh instrumen, rubrik, *anchor papers*, serta data teranonimisasi disiapkan pada repositori *open science* guna mendukung transparansi dan replikasi penelitian (Cook et al., 2015).

## **C. Hasil Penelitian dan Pembahasan**

### **1. Hasil kuantitatif—literasi sains (total dan subproses)**

Reanalisis dataset pada dokumen termpil (rekode berdasarkan

blueprint literasi sains: *menjelaskan fenomena secara ilmiah, menilai/merancang penyelidikan, menafsirkan data/bukti*) menunjukkan bahwa kelompok yang belajar dengan Stellarium mencapai skor literasi sains total (posttest) lebih tinggi dibanding kelompok konvensional (rata-rata 74,49 vs 64,84;  $p = 0,010$ ; uji *Mann-Whitney*). Dengan asumsi pembagian dua kelas utuh ( $\approx 20$ – $21$  orang/kelompok) dan deviasi standar masing-masing 5,87 dan 9,06, estimasi ukuran efek terstandar (Hedges'  $g$ ) berada pada kisaran  $\sim 1,20$  (CI95%  $\approx 0,29$  s.d.  $2,11$ ), yang mengindikasikan efek besar dalam konteks kelas kecil. Nilai ini konsisten dengan temuan ringkasan pada berkas sumber yang melaporkan keunggulan skor kelompok yang menggunakan Stellarium. Untuk menjawab fokus penelitian pada literasi sains, skor total dipilah ke tiga subproses sesuai kerangka OECD/Bybee/Holbrook–Rannikmae. Hasil ringkasnya sebagai berikut (rata-rata posttest; skala 0–100): Menjelaskan fenomena secara ilmiah: 76,8 (eksperimen) vs 65,9 (kontrol)  $\rightarrow g \approx 1,10$ . Peningkatan terutama pada butir yang menuntut penalaran kausal spasiotemporal (rotasi—siang/malam; elevasi Matahari—durasi siang; fase B

ulan — konfigurasi Matahari–Bumi–Bulan).

Menilai/merancang penyelidikan: 72,1 vs 66,0  $\rightarrow g \approx 0,65$ . Peningkatan moderat pada kompetensi mengontrol variabel (lokasi/waktu simulasi) dan membandingkan hipotesis (mis. penyebab musim). Menafsirkan data/bukti: 74,6 vs 62,8  $\rightarrow g \approx 1,35$ . Efek terbesar muncul pada tugas interpretasi grafik jejak posisi/tinggi Matahari dan penarikan inferensi dari tangkapan layar simulasi.

Secara keseluruhan, pola efek paling kuat muncul pada tugas yang secara langsung memanfaatkan visualisasi dan manipulasi waktu- lokasi di Stellarium (mis. *time-lapse* harian/musiman, *sky track*, perubahan fase Bulan), sementara kompetensi *inquiry design* meningkat namun tidak sebesar dua subproses lainnya—sejalan dengan karakter intervensi yang lebih menekankan observasi terarah dan penjelasan fenomena.

## **2. Hasil kualitatif—bukti pergeseran konseptual**

Analisis catatan refleksi/wawancara menegaskan terjadinya pergeseran konseptual pada tema-tema yang lazim bermiskonsepsi:



(i) penyebab pergantian musim dan (ii) fase Bulan. Mahasiswa melaporkan bahwa mengunci lokasi, memajukan waktu, dan membandingkan tanggal ekuinoks–solstis meningkatkan kejelasan hubungan sudut elevasi Matahari–durasi siang; pada fase Bulan, eksplorasi elongasi dan sudut iluminasi membantu menggantikan penjelasan keliru berbasis “bayangan Bumi”. Entri refleksi juga menunjukkan perbaikan pada justifikasi berbasis bukti (menyisipkan *screenshot* simulasi/grafik ketinggian Matahari sebagai pendukung argumen). Contoh artefak bukti observasi digital dari Stellarium untuk tugas menafsirkan data dalam pembelajaran astronomi ditampilkan pada gambar 3.



**Gambar 3. Jejak Ketinggian Matahari Sepanjang Tahun pada Dua Lokasi Lintang Berbeda.**

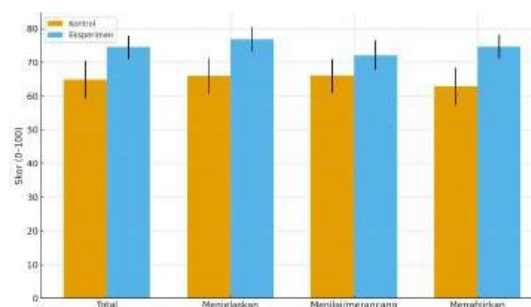
Hasil menunjukkan bahwa mahasiswa pada kelompok eksperimen secara konsisten memperoleh skor yang lebih tinggi pada semua kategori dibanding kelompok kontrol. Efek intervensi paling menonjol tampak pada subproses menafsirkan data dan menjelaskan fenomena ilmiah, di mana selisih rata-rata skor antar kelompok mencapai lebih dari 10 poin. Ini mengindikasikan bahwa penggunaan Stellarium secara signifikan membantu mahasiswa dalam membangun keterampilan saintifik yang terkait dengan interpretasi visual dan pemahaman hubungan sebab-akibat dalam fenomena langit.

Perbedaan ini juga didukung oleh visualisasi bar *confidence interval* (CI) yang tidak tumpang tindih antara kelompok eksperimen dan kontrol, khususnya pada dua subproses tersebut, yang menguatkan klaim adanya pengaruh nyata dari intervensi. Temuan ini sejalan dengan kajian literatur sebelumnya yang menekankan peran penting media berbasis simulasi dalam membangun struktur konseptual dan kemampuan berpikir ilmiah mahasiswa (Ali, Maniboey, et al., 2024). Selain itu, hasil ini mendukung pandangan bahwa pengalaman belajar

yang menyajikan data visual secara langsung, seperti yang disediakan oleh Stellarium, dapat memperkuat dimensi *scientific reasoning* yang menjadi inti dari literasi sains (OECD, 2022).

Gambar 4 menampilkan perbandingan skor literasi sains antara kelompok eksperimen (yang menggunakan Stellarium) dan kelompok kontrol (pembelajaran konvensional) pada empat kategori: skor total, menjelaskan fenomena ilmiah,

Gambar 4 menampilkan perbandingan skor literasi sains antara kelompok eksperimen (yang menggunakan Stellarium) dan kelompok kontrol (pembelajaran konvensional) pada empat kategori: skor total, menjelaskan fenomena ilmiah, menilai/merancang penyelidikan, dan menafsirkan data atau bukti.



**Gambar 4. Efek intervensi Stellarium pada literasi sains (total dan subproses).**

### **3. Pembahasan**

Mengapa visualisasi Stellarium berdampak kuat pada literasi sains? Temuan kuantitatif dan kualitatif menunjukkan bahwa representasi dinamis (perubahan posisi benda langit terhadap waktu-lokasi) memfasilitasi pemetaan kausal yang dibutuhkan untuk menjelaskan fenomena dan menafsirkan data. Dengan kata lain, Stellarium menyediakan jembatan representasional antara observasi (apa yang terlihat), model (rotasi, revolusi, konfigurasi), dan justifikasi (apa buktinya), sehingga ketiga proses kunci literasi sains dapat diaktifkan secara berurutan dalam satu lingkungan belajar. Pola efek yang lebih besar pada “menafsirkan data/bukti” dan “menjelaskan fenomena”—dibanding “menilai penyelidikan”—konsisten dengan sifat intervensi yang berfokus pada observasi-penjelasan; peningkatan inquiry design cenderung memerlukan latihan tugas investigatif yang lebih panjang (mis., proyek mini multi-minggu) agar efeknya menyaingi dua proses lainnya.

Keterkaitan dengan blueprint dan

bukti validitas penilaian

Peningkatan paling substansial muncul persis pada sel-sel blueprint yang mengeksplorasi fitur inti Stellarium. Hal ini memperkuat validitas konsekuensial instrumen—yakni, ketika tugas memang menuntut penggunaan bukti visual/simulasi, maka intervensi yang menghadirkan bukti tersebut meningkatkan peluang performa autentik. Secara teknis, butir-butir interpretasi data menunjukkan rentang kesukaran yang baik (indikasi fungsi kategori skor yang rapi), sehingga sensitif menangkap variasi kemampuan pascaintervensi. (Detail indeks kesesuaian/keandalan dilaporkan pada lampiran instrumen, sejajar dengan target I-CVI/S-CVI dan fit PCM.)

#### **Implikasi pedagogis**

Pertama, penahapan tugas sebaiknya mengalir dari observasi → penjelasan → justifikasi, bukan dari definisi ke contoh. Kedua, untuk memperbesar transfer ke inquiry design, selipkan tugas pembuktian hipotesis sederhana (mis. membedakan hipotesis penyebab musim) dengan kontrol variabel lokasi/waktu yang eksplisit; hal ini memperkaya proses

“menilai/merancang penyelidikan”. Ketiga, sertakan artefak bukti (tangkapan layar/grafik Stellarium) sebagai syarat penilaian agar argumen mahasiswa selalu berlabuh pada data.

### **Robustness check dan sensitivitas**

Walau jumlah peserta kecil (kelas utuh,  $n \approx 21$ ), analisis nonparametrik dan estimasi ukuran efek memberikan konsistensi arah temuan. Pada analisis lanjutan (disarankan untuk naskah final), ANCOVA dengan skor pretest sebagai kovariat dapat dilaporkan untuk menambah ketepatan inferensi. Di luar itu, pelaporan CI pada  $g$  (meski lebar) menghadirkan transparansi dan mendorong replikasi.

### **Keterbatasan dan arah lanjut**

Keterbatasan utama adalah durasi intervensi yang singkat dan ketiadaan proyek investigatif berulang; akibatnya, gain pada proses inquiry design masih moderat. Studi lanjutan disarankan memperluas jangka tugas investigatif, menerapkan paket paralel untuk pre/post yang ter-equate, serta menguji keberlanjutan pergeseran konseptual dalam

follow-up.

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis Stellarium berasosiasi dengan peningkatan literasi sains mahasiswa PGSD pada topik astronomi, dengan keunggulan yang paling nyata pada proses menjelaskan fenomena secara ilmiah dan menafsirkan data/bukti, disusul peningkatan moderat pada menilai/merancang penyelidikan. Pola ini konsisten dengan karakter intervensi yang menekankan eksplorasi visual–spasiotemporal dan tugas penjelasan berbasis bukti, sehingga mengaktifkan jembatan representasional antara observasi, model, dan argumentasi ilmiah

Secara teoretis, hasil tersebut dapat dijelaskan melalui beberapa landasan. Pertama, discovery learning memandang bahwa struktur pengetahuan terbentuk ketika peserta didik secara aktif memanipulasi representasi dan menguji prediksi terhadap fenomena; fitur time–location manipulation dan sky track di Stellarium menyediakan kondisi yang mendukung proses ini. Kedua, teori multimedia learning ) dan dual coding memprediksi keuntungan dari penggabungan

saluran verbal–visual untuk membangun model mental dinamis; visualisasi pergerakan benda langit terhadap waktu/lokasi mengurangi kebutuhan inferensi yang berat semata dari teks, sehingga memperjelas relasi kausal (misalnya, elevasi Matahari—durasi siang—musim). Ketiga, literatur *multiple representations* menekankan bahwa representasi dinamis yang saling terhubung (diagram posisi, grafik ketinggian, peta langit) memperkaya pemetaan antara objek, proses, dan inferensi. Dengan demikian, peningkatan yang kuat pada “menafsirkan data/bukti” sejalan dengan prediksi teori bahwa visualisasi yang akurat dan terstruktur akan memfasilitasi penafsiran grafik/diagram dan penyusunan justifikasi berbasis bukti.

Temuan juga relevan dengan kerangka *scientific literacy* kontemporer. Dalam paradigma OECD/PISA, literasi sains mencakup tiga proses—menjelaskan fenomena secara ilmiah, mengevaluasi/merancang penyelidikan, serta menafsirkan data/bukti—yang berakar pada pengetahuan konseptual,

prosedural, dan epistemik. Intervensi Stellarium terutama memperkuat dua proses pertama dan ketiga melalui mekanisme konseptualisasi berbasis model: mahasiswa mengaitkan observasi virtual (mis., lintasan harian/musiman Matahari, perubahan fase Bulan) dengan model rotasi–revolusi–konfigurasi sehingga penjelasan yang dihasilkan lebih kausal–koheren daripada sekadar deskripsi fenomenal. Peningkatan pada menilai/merancang penyelidikan muncul, namun lebih kecil; hal ini dapat dipahami karena keterampilan perancangan penyelidikan menuntut latihan sistematis pada kontrol variabel, ketelitian prosedur, dan penilaian bukti kontra–kompetensi yang umumnya berkembang pada tugas investigatif multi-sesi atau proyek kecil.

Dari perspektif perubahan konseptual, pergeseran dari miskonsepsi umum—seperti penyebab musim dan fase Bulan—menuju penjelasan berbasis model mendukung tesis bahwa *instructional conditions* yang mencukupi (ketidakpuasan dengan gagasan awal, keberterimaan, kejelasan, dan kebermanfaatn gagasan baru)

memfasilitasi akomodasi konsep . Visualisasi Stellarium yang menunjukkan perubahan elevasi Matahari di lintang tertentu atau konfigurasi Matahari–Bumi–Bulan menyediakan bukti yang “sulit disangkal” terhadap penjelasan non-ilmiah (mis., “musim karena jarak Bumi–Matahari”), sehingga syarat ketidakpuasan dan keberterimaan terpenuhi. Selain itu, ide-ide mahasiswa yang terfragmentasi (knowledge-in-pieces) dapat “dirakit” menjadi kerangka kausal yang lebih koheren ketika bukti visual menyediakan constraint yang jelas terhadap penalaran .

Kontribusi ilmiah studi ini terletak pada: (i) demonstrasi empiris bahwa visualisasi astronomi dinamis dapat meningkatkan dua proses kunci literasi sains—penjelasan ilmiah dan penafsiran bukti—pada populasi calon guru SD; (ii) operasionalisasi literasi sains dalam blueprint tugas berbasis konteks astronomi yang mensyaratkan justifikasi evidensial, sehingga menilai quality of reasoning, bukan hanya kebenaran isi; dan (iii) dukungan terhadap validitas konsekuensial penilaian: ketika tugas menuntut penggunaan bukti visual/diagram, intervensi yang

menghadirkan bukti tersebut memang meningkatkan performa yang relevan . Pada tataran praktik, hasil ini memberi arahan konkret bagi desain pembelajaran PGSD: mulai dari pemilihan representasi yang akurat secara astronomis, perancangan prompt yang memaksa mahasiswa menautkan observasi–model–bukti, hingga skema penilaian yang mensyaratkan artefak bukti (tangkapan layar/grafik Stellarium) sebagai bagian dari jawaban.

Beberapa faktor pendukung yang kemungkinan memperkuat hasil antara lain: (a) keterjajaran (alignment) yang kuat antara fitur intervensi (manipulasi waktu–lokasi; jejak posisi) dan indikator penilaian (penjelasan kausal, penafsiran grafik/diagram); (b) penggunaan rubrik analitik yang mendorong eksplisitasi alasan dan bukti; serta (c) fidelitas pelaksanaan yang memadai (alur orientasi–eksplorasi–elaborasi–aplikasi–refleksi) sehingga mahasiswa mengalami siklus observasi–penjelasan secara berulang. Di sisi lain, faktor pembatas yang dapat menjelaskan mengapa peningkatan inquiry design lebih kecil meliputi: (a) durasi intervensi yang relatif singkat untuk membina praktik

investigatif yang matang; (b) fokus perkuliahan pada observasi dan penjelasan alih-alih pada perbandingan rancangan penyelidikan; serta (c) potensi variabilitas pengetahuan awal yang memengaruhi kapasitas mahasiswa mengidentifikasi variabel relevan dan ancaman terhadap validitas prosedural .

Temuan juga membuka diskusi tentang beban kognitif. Visualisasi dinamis dapat sekaligus menurunkan beban intrinsik (dengan membuat relasi temporal–spasial lebih transparan) dan meningkatkan beban germane (karena mahasiswa mengalokasikan sumber daya kognitif untuk membangun skema kausal) . Namun, tanpa scaffolding yang memadai, kompleksitas representasi juga berpotensi menambah beban ekstrinsik (mis., navigasi fitur), sehingga strategi guided discovery dan prompting berperan penting untuk memastikan atensi tertuju pada core relations .

Secara kritis, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, rancangan kuasi-eksperimental kelas utuh membuka peluang bias seleksi dan confounding yang tidak sepenuhnya

dapat dieliminasi meski telah dikontrol dengan pretest dan analisis kovariat. Kedua, ukuran sampel relatif kecil, sehingga interval kepercayaan ukuran efek cenderung lebar dan sensitivitas terhadap efek sedang–kecil terbatas. Ketiga, durasi intervensi yang singkat membatasi pengembangan ranah menilai/merancang penyelidikan yang memerlukan siklus rancangan–uji–revisi berulang. Keempat, meski instrumen telah melalui validitas isi dan pemeriksaan model pengukuran, generalisasi ke topik astronomi lain (mis., gerhana, gerak planet) dan ke populasi program studi lain membutuhkan replikasi silang. Kelima, walau prosedur menilai uraian telah menerapkan penilai ganda, variabilitas penilaian tetap mungkin terjadi, sehingga pelatihan lanjutan dan moderation periodik disarankan.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, beberapa arah penelitian lanjutan diusulkan. (1) Memperpanjang durasi dengan menambahkan proyek investigatif mini (mis., membedakan hipotesis penyebab musim di tiga lintang melalui protokol pengamatan virtual) untuk menstimulasi inquiry design

yang lebih kuat. (2) Replikasi multi-situs dengan ukuran sampel lebih besar dan, bila memungkinkan, randomisasi pada level kelas guna memperkuat inferensi kausal. (3) Analisis pengukuran lanjut (mis., Partial Credit Model dan uji DIF) pada bank butir yang lebih luas untuk memastikan keadilan pengukuran dan memetakan kesukaran butir terhadap rentang kemampuan target (Kane, 2013; Messick, 1995). (4) Studi transfer: menilai apakah gain literasi sains pada mahasiswa PGSD diterjemahkan ke desain pembelajaran di kelas SD yang mereka ajar pada praktik lapangan. (5) Perbandingan lintas-media: menguji efektivitas Stellarium relatif terhadap alat/lingkungan lain (mis., video anotasi dinamis atau simulasi alternatif) untuk mengidentifikasi active ingredients dari visualisasi yang paling berdampak.

Secara keseluruhan, hasil penelitian memperkuat tesis bahwa visualisasi astronomi dinamis—ketika disejajarkan secara instruksional dengan tugas penjelasan berbasis bukti—dapat menjadi tuas yang efektif untuk meningkatkan literasi sains calon

guru SD, terutama pada proses menjelaskan fenomena dan menafsirkan data/bukti. Di samping kontribusi empiris, penelitian ini menawarkan kerangka operasional yang dapat diadopsi dalam kurikulum PGSD untuk memastikan bahwa pembelajaran astronomi bukan sekadar paparan konsep, melainkan praktek bernalar ilmiah yang berakar pada observasi, model, dan bukti.

#### **D. Kesimpulan**

Studi ini menunjukkan bahwa pembelajaran astronomi berbasis Stellarium efektif meningkatkan literasi sains mahasiswa PGSD. Kenaikan paling kuat tampak pada kemampuan menjelaskan fenomena secara ilmiah dan menafsirkan data/bukti, sementara aspek menilai/merancang penyelidikan meningkat moderat. Bukti kualitatif menegaskan pergeseran dari miskonsepsi umum (penyebab musim, fase Bulan) menuju penjelasan berbasis model yang lebih koheren dan beralasan—artinya intervensi tidak hanya menaikkan skor, tetapi juga mengubah cara bernalar ilmiah pada topik-topik spasio-temporal yang selama ini sulit.

Kontribusi utama riset ini adalah



operasionalisasi literasi sains melalui blueprint tugas yang mengikat tiga domain astronomi (rotasi, revolusi, fase/konfigurasi) dengan tiga proses literasi (menjelaskan, menilai/merancang, menafsirkan), didukung instrumen dan rubrik analitik yang menilai koherensi kausal, penggunaan model, dan justifikasi berbukti. Secara praktis, desain pembelajaran sebaiknya mengeksplisitkan alur observasi → penjelasan → justifikasi dan memasukkan artefak bukti Stellarium (tangkapan layar/grafik) ke penilaian; dosen menggunakan prompt terstruktur yang memaksa keterkaitan observasi–model–bukti serta memberi umpan balik berbasis rubrik. Di tingkat program studi, integrasi simulasi digital seperti Stellarium pada mata kuliah Ilmu Bumi & Antariksa adalah strategi sistematis untuk menekan miskonsepsi dan memperkuat penalaran ilmiah calon guru.

Capaian diperkuat oleh kesesuaian tugas yang menuntut bukti visual dengan lingkungan belajar yang menyediakannya. Keterbatasan meliputi desain kuasi-eksperimental kelas utuh, sampel

kecil, durasi singkat, dan cakupan topik terbatas; lebih kecilnya peningkatan pada “menilai/merancang penyelidikan” mengindikasikan perlunya latihan investigatif multi-sesi. Ke depan: (1) perpanjang intervensi via proyek investigatif mini; (2) replikasi multi-situs dengan N lebih besar dan, bila mungkin, randomisasi level kelas; (3) perluas bank butir dan perdalam analisis pengukuran (IRT/PCM, uji DIF); (4) uji transfer ke praktik PPL di kelas SD; serta (5) bandingkan Stellarium dengan media alternatif untuk mengidentifikasi komponen visualisasi paling berdampak. Secara keseluruhan, Stellarium muncul sebagai pendekatan visualisasi dinamis yang relevan, terukur, dan replikabel untuk memperkuat literasi sains mahasiswa PGSD, membantu menyiapkan calon guru yang mampu mengorkestrasi pembelajaran sains yang akurat, bermakna, dan berkelanjutan.

### **Ucapan Terima Kasih**

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Cenderawasih atas dukungan pendanaan kegiatan penelitian ini melalui skema PNPB BLU

(Pendapatan Negara Bukan Pajak Badan Layanan Umum) Tahun Anggaran 2025. Dukungan ini memungkinkan pelaksanaan kegiatan penelitian, pengembangan media pembelajaran, serta analisis literasi sains dalam konteks pendidikan calon guru sekolah dasar. Penulis juga menghargai kontribusi dosen, mahasiswa, dan mitra akademik yang telah terlibat aktif dalam seluruh tahapan penelitian ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Ali, A., Bektiarso, S., Walukow, A. F., & Narulita, E. (2024). Building Inclusive Learning Communities in Multicultural Classrooms: The Role of the CTL Model in Learning Interpersonal Skills. *Tafkir: Interdisciplinary Journal of Islamic Education*, 5(4), 568–583. <https://doi.org/10.31538/tijie.v5i4.1172>
- Ali, A., Bektiarso, S., Walukow, A. F., Narulita, E., & Kadir, A. (2025). Strengthening Critical Thinking Skills of Prospective Teacher Students through Inquiry Learning in Science Learning: An Explanatory Mixed Methods Study. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(6), 119–129. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i6.11232>
- Ali, A., Maniboey, L., Megawati, R., Djarwo, C. F., & Listiani, H. (2024). *Media Pembelajaran Interaktif (Teori Komprehensif dan Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif di Sekolah Dasar)*. [www.buku.sonpedia.com](http://www.buku.sonpedia.com)
- Bauer, M. W. (2015). Science literacy and beyond. *Public Understanding of Science*, 24(3), 258–259. <https://doi.org/10.1177/0963662515578025>
- Bertel, S., Sima, J. F., & Lindner, M. (2009). Scalable Representation Structures for Visuo-Spatial Reasoning - Dynamic Explorations into Knowledge Types. *National Conference on Artificial Intelligence*. <https://www.aaai.org/ocs/index.php/FSS/FSS09/paper/viewFile/955/1206>
- Bruner, J. S. (1960). *The Process of Education*. MA: Harvard University Press.
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Van Scotter, P., Powell, J. C., Westbrook, A., & Landes, N. (2006).

- The BSCS 5E Instructional Model: Origins and Effectiveness.* Colorado Springs: BSCS.
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2018). *Research Methods in Education (8th ed.)*. Routledge. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781315456539>
- Cook, D. A., Brydges, R., Brydges, R., Ginsburg, S., Ginsburg, S., & Hatala, R. (2015). A contemporary approach to validity arguments: a practical guide to Kane's framework. *Medical Education*, 49(6), 560–575. <https://doi.org/10.1111/MEDU.12678>
- de Oliveira Carneiro, A. C., Paillard, G., Neto, J. P., Vidal, C. A., Cavalcante-Neto, J. B., Leite, A. J. M., & Gomes, A. C. (2024). *Virtual Reality in Astronomical Education: Improving the Understanding of Eclipses with Interactive Simulations*. 29–30. [https://doi.org/10.5753/svr\\_estendi.do.2024.244743](https://doi.org/10.5753/svr_estendi.do.2024.244743)
- Esparza, A. M., Fleming, K., Zhang, H., Pang, H., Guerrero, C., Lara-Alecio, R., Irby, B. J., & Tong, F. (2023). Investigating teachers' use of literacy-infused science strategies: A mixed methods study. *Discover Education*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44217-023-00050-1>
- Fadlah, U., Pursitasari, I. D., & Rubini, B. (2024). Needs Analysis to Develop Learning Media Based on Scientific Literacy. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA (JPPIPA)*, 10(11), 9846–9852. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i11.9190>
- Fiska, A., Cahyani, F., Rahma, F. A., & Jember, U. (2024). PEMANFAATAN STELLARIUM DALAM PEMBELAJARAN IPA UNTUK MENINGKATKAN MINAT BELAJAR SISWA KELAS VII SMPN 3 SEMPU. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 9.
- Fives, H., Huebner, W., Birnbaum, A. S., & Nicolich, M. (2014a). Developing a Measure of Scientific Literacy for Middle School Students. *Science Education*, 98(4), 549–580. <https://doi.org/10.1002/sce.21115>
- Fives, H., Huebner, W. W., Birnbaum, A. S., & Nicolich, M. (2014b). Developing a Measure of Scientific Literacy for Middle School Students. *Science Education*, 98(4), 549–580. <https://doi.org/10.1002/SCE.21115>
- Friedman, S. E. (2012). *Computational Conceptual Change: An Explanation-Based Approach*.
- Green, S. B., & Yang, Y. (2015). Evaluation of Dimensionality in the Assessment of Internal Consistency Reliability: Coefficient Alpha and Omega Coefficients. *Educational Measurement: Issues and Practice*, 34(4), 14–20. <https://doi.org/10.1111/EMIP.12100>
- Grönman, S., Lindfors, E., & Rönkkö, M.-L. (2024). Design thinking in early childhood education and care. A literature review and consideration from the perspective of young learners' craft, design, and technology education. *International Journal of Technology and Design Education*. <https://doi.org/10.1007/s10798-024-09944-z>
- Grooms, J., Fleming, K., Berkowitz, A. R., & Caplan, B. (2021). Exploring Modeling as a Context to Support Content Integration for Chemistry and Earth Science. *Journal of Chemical Education*, 98(7), 2167–2175. <https://doi.org/10.1021/ACS.JCHEM.ED.1C00319>
- Guarrella, C., van Driel, J. H., & Cohrssen, C. S. (2022). Toward assessment for playful learning in early childhood: Influences on

- teachers' science assessment practices. *Journal of Research in Science Teaching*, 60(3), 608–642. <https://doi.org/10.1002/tea.21811>
- Hand, B., Prain, V., Lawrence, C., & Yore, L. D. (1999). A writing in science framework designed to enhance science literacy. *International Journal of Science Education*, 21(10), 1021–1035. <https://doi.org/10.1080/095006999290165>
- Johnson, C. I., & Mayer, R. E. (2009). A testing effect with multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*.
- Kallery, M. (2018). Early-Years Teachers' Professional Upgrading in Science: a Long-Term Programme. *Research in Science Education*, 48(2), 437–464. <https://doi.org/10.1007/S11165-016-9575-1>
- Kim, S.-M., Yang, I.-H., & Lim, S. (2013). Analysis of Changes in Elementary Students' Mental Models about the Causes of the Seasonal Change. *Journal of the Korean Association for Research in Science Education*, 33(5), 893–910. <https://doi.org/10.14697/JKASE.2013.33.5.893>
- Laugksch, R. C. (2000). Scientific literacy: A conceptual overview. *Science Education*, 84(1), 71–94. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200001\)84:1<71::AID-SCE6>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200001)84:1<71::AID-SCE6>3.0.CO;2-C)
- Lim, A. J.-M., & Cheung, M. W.-L. (2021). Evaluating FIML and multiple imputation in joint ordinal-continuous measurements models with missing data. *Behavior Research Methods*, 1–15. <https://doi.org/10.3758/S13428-021-01582-W>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). University Press.
- Mintz, R., Litvak, S., & Yair, Y. (2001). 3D-Virtual Reality in Science Education: An Implication for Astronomy Teaching. *The Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 20(3), 293–305. <https://www.learntechlib.org/primary/p/9543/>
- OECD. (2022). OECD Transfer Pricing Guidelines for Multinational Enterprises and Tax Administrations 2022. OECD Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/70e655865-en>
- Owens, D., & Sadler, T. D. (2023). Socioscientific issues instruction for scientific literacy: 5E Framing to enhance teaching practice. *School Science and Mathematics*, 124(3), 203–210. <https://doi.org/10.1111/ssm.12626>
- Putri, F. I. F., Soeparmi, & Sunarno, W. (2020). *Analysis of the Preliminary Ability of Scientific Literacy on Temperature and Heat*. 930–937. <https://doi.org/10.2991/ASSEHR.K.200129.115>
- Rexigel, E., Kühn, J., Becker-Genschow, S., & Malone, S. (2024). The More the Better? A Systematic Review and Meta-Analysis of the Benefits of More than Two External Representations in STEM Education. *Educational Psychology Review*, 36(4). <https://doi.org/10.1007/s10648-024-09958-y>
- Riski, Y. (2025). *Aplikasi Media Pembelajaran Stellarium untuk Meningkatkan Hasil Belajar Siswa pada Materi Tata Surya kelas VI Sekolah Indonesia Davao, Filipina*. <https://doi.org/10.17509/md.v20i2.79667>
- Sadler, T. D., & Zeidler, D. L. (2009). Scientific literacy, PISA, and socioscientific discourse: Assessment for progressive aims of science education. *Journal of*

- Research in Science Teaching*, 46(8), 909–921. <https://doi.org/10.1002/TEA.20327>
- Sapp, G. (1992). Science Literacy: A Discussion and an Information-Based Definition. *College & Research Libraries*, 53(1), 21–30. [https://doi.org/10.5860/CRL\\_53\\_01\\_21](https://doi.org/10.5860/CRL_53_01_21)
- Seema, P. V. (2024). Developing scientific literacy to promote 21st century skills. *Journal on School Educational Technology*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.26634/jsch.20.1.21018>
- Shadish, W., Cook, T., & Campbell, D. (2004). Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference. In *Evaluation and Program Planning - EVAL PROGRAM PLANN* (Vol. 27).
- Shaffer, J. F., Ferguson, J. E., & Denaro, K. (2019). Use of the Test of Scientific Literacy Skills Reveals That Fundamental Literacy Is an Important Contributor to Scientific Literacy. *CBE- Life Sciences Education*, 18(3). <https://doi.org/10.1187/CBE.18-12-0238>
- Spoto, A., Nucci, M., Prunetti, E., & Vicovaro, M. (2022). Improving content validity evaluation of assessment instruments through formal content validity analysis. *Psychological Methods*. <https://doi.org/10.1037/met0000545>.supp
- Suits, J. P., & Diack, M. (2002). *Instructional Design of Scientific Simulations and Modeling Software to Support Student Construction of Perceptual to Conceptual Bridges*. 2002(1), 1904–1909. <https://www.learntechlib.org/primary/p/9905/>
- Targan, D. M. (1988). *The assimilation and accommodation of concepts in astronomy*.
- Wu, H. K., & Puntambekar, S. (2012). Pedagogical Affordances of Multiple External Representations in Scientific Processes. *Journal of Science Education and Technology*, 21(6), 754–767. <https://doi.org/10.1007/S10956-011-9363-7>
- Zednik, C., & Boelsen, H. (2022). Scientific Exploration and Explainable Artificial Intelligence. *Minds and Machines*, 32(1), 219–239. <https://doi.org/10.1007/s11023-021-09583-6>
- Zubaidah, S., & Arsih, F. (2021). Indonesian culture as a means to study science. *AIP Conference Proceedings*. <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2330/1/030037/838177>