
Integrating Ethno-SSI into Project-Based Inquiry Learning: A Cross-Cultural Approach between Indonesia and Malaysia to Foster Sustainable Environmental Literacy

Sudarmin, Dwi Yulianti, Skunda Diliarosta, Dwi Septiana Sari, Yasmin Azzahra, ,
, Fonny Dameatry Hutagalung, Novi Ratna Dewi.

¹Pendidikan Kimia, Universitas Negeri Semarang, INDONESIA,

⁵ Pendidikan IPA, Universitas Negeri Semarang, INDONESIA
ariyatun@students.unnes.ac.id

Abstrak

Tantangan lingkungan global membutuhkan pendekatan pembelajaran sains yang mengintegrasikan pengetahuan ilmiah, kearifan lokal, dan isu-isu keberlanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi model pembelajaran *project inquiry* terintegrasi Ethno-SSI berbasis budaya rempah Indonesia dan Malaysia—termasuk wedhang uwuh, kayu manis, bumbu rendang, dan bumbu kari Malaysia—untuk meningkatkan *Sustainability Environmental Literacy* (Literasi Lingkungan Keberlanjutan) mahasiswa. Penelitian ini menggunakan pendekatan *design-based research* (DBR) yang melibatkan tahapan analisis, perancangan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi. Data dikumpulkan melalui observasi, kuesioner, wawancara, serta penilaian pembelajaran, lalu dianalisis menggunakan metode deskriptif dan kualitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang dikembangkan valid secara konseptual, relevan secara kontekstual, dan efektif dalam mendorong keterlibatan inkuiri serta *Sustainability Environmental Literacy*. Integrasi etnosains, isu-isu sosiosaintifik, dan proyek inkuiri memungkinkan mahasiswa menghubungkan konsep-konsep ilmiah dengan pengetahuan rempah lokal, praktik budaya, perspektif kesehatan, dan tantangan keberlanjutan melalui pengalaman belajar yang otentik. Mahasiswa juga menunjukkan persepsi positif dan keterlibatan aktif sepanjang proses pembelajaran. Penelitian ini menyumbangkan kerangka kerja inovatif untuk mengintegrasikan etnosains, isu socio-scientific, dan pembelajaran inkuiri dalam konteks lintas budaya. Temuan ini menegaskan potensi pembelajaran sains berkonteks budaya dalam memperkuat pendidikan berorientasi keberlanjutan di perguruan tinggi.

Kata Kunci: Ethno-SSI, Pembelajaran Inkuiri Berbasis Proyek, Literasi Lingkungan Keberlanjutan, Pendidikan Lintas Budaya, Kearifan Lokal

1. Pendahuluan

Tantangan global—termasuk perubahan iklim, hilangnya keanekaragaman hayati, dan eksploitasi sumber daya alam yang tidak berkelanjutan—telah meningkatkan urgensi transformasi pendidikan yang selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). Dalam konteks ini, Literasi Lingkungan Berkelanjutan (Sustainability Environmental Literacy atau SEL) muncul sebagai capaian pendidikan krusial yang mencakup dimensi kognitif, sosial-emosional, dan perilaku, yang memungkinkan individu untuk menyikapi isu-isu keberlanjutan secara bertanggung jawab (UNESCO, 2017; UNESCO, 2020; Wals, 2015). Oleh karena itu, Pendidikan untuk Pembangunan Berkelanjutan (Education for Sustainable Development atau ESD) memegang peranan penting dalam membekali peserta didik dengan kompetensi yang diperlukan untuk menghadapi tantangan lingkungan, sosial, dan ekonomi abad ke-21 (González-Salamanca dkk., 2020). Namun, pendidikan sains masih terus menekankan pada transmisi pengetahuan ilmiah semata tanpa mengintegrasikan pengalaman sosial-budaya dan konteks lokal secara memadai, sehingga membatasi pengembangan keterampilan pemecahan masalah yang kontekstual dan pengambilan keputusan yang berorientasi pada keberlanjutan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan Model Pembelajaran Inkuiri Integrated Ethno-SSI (MPI Ethno-SSI) yang berlandaskan pada kearifan lokal Indonesia dan Malaysia. Model ini dikembangkan berdasarkan penelitian terdahulu mengenai pembelajaran berbasis inkuiri, etnosains, dan Ethno-SSI, serta didukung oleh landasan teoretis dan empiris dari bidang etnosains, pendidikan STEM, dan pembelajaran abad ke-21 guna mendorong pembelajaran sains yang kontekstual, inovatif, dan berorientasi pada keberlanjutan.

Dalam penelitian ini, konteks pembelajaran difokuskan pada makanan dan minuman tradisional berbasis rempah, seperti nasi lemak, teh tarik, rendang, wedang uwuh, dan berbagai ramuan herbal yang merepresentasikan kearifan lokal Indonesia dan Malaysia. Selain memiliki nilai budaya, rempah-rempah mengandung senyawa bioaktif dan volatil yang menyediakan konteks autentik bagi inkuiri ilmiah sekaligus mencerminkan pemanfaatan keanekaragaman hayati secara berkelanjutan. Sebagai bagian dari sistem pengetahuan lokal (indigenous knowledge systems), produk-produk ini mencerminkan nilai-nilai keberlanjutan yang selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya terkait kesehatan, konsumsi yang bertanggung jawab, dan pelestarian lingkungan. Konteks yang relevan secara budaya meningkatkan keterlibatan siswa dalam pembelajaran sains (González-Salamanca dkk., 2020) serta menumbuhkan kemampuan berpikir kritis, pengambilan keputusan berbasis bukti, keterampilan berpikir tingkat tinggi, dan kompetensi keberlanjutan (Zeidler dkk., 2005; Levinson, 2018; Chen & Yang, 2019; Muñoz-Saavedra dkk., 2020). Melalui eksplorasi tradisi rempah lokal, siswa mengaitkan konsep ilmiah dengan pengetahuan budaya dan praktik berkelanjutan, sehingga memperkuat Literasi Lingkungan Berkelanjutan (SEL) mereka. Dengan demikian, pengetahuan lokal berbasis rempah menjadi landasan yang bermakna untuk mengintegrasikan sains, budaya, dan keberlanjutan dalam pendidikan.

Dengan memanfaatkan potensi konteks berbasis rempah lokal untuk memperkuat Literasi Lingkungan Berkelanjutan (Sustainability Environmental Literacy atau SEL), Pendidikan untuk Pembangunan Berkelanjutan (Education for Sustainable Development atau ESD) mendorong pembelajaran transformatif yang mengintegrasikan pengetahuan, nilai, dan tindakan. Namun, penerapannya masih terkendala oleh tantangan konseptual dan pedagogis. Isu sosial-ilmiah (Socio-scientific issues atau SSI) secara efektif

menumbuhkan penalaran kritis dan pengambilan keputusan terkait lingkungan (Zeidler dkk., 2005; Levinson, 2018), namun sering kali kurang terhubung dengan sistem pengetahuan lokal. Sebaliknya, etnosains mengintegrasikan pengetahuan masyarakat adat ke dalam pembelajaran sains (Aikenhead, 2006), namun penerapannya sebagian besar masih bersifat deskriptif dan memiliki keterkaitan yang lemah dengan proses inkuiri. Pembelajaran inkuiri berbasis proyek menawarkan alternatif yang menjanjikan dengan mengedepankan pembelajaran yang berpusat pada siswa, pemecahan masalah yang autentik, dan keterampilan berpikir tingkat tinggi (Krajcik & Blumenfeld, 2006; Chen & Yang, 2019), sekaligus meningkatkan keterlibatan siswa (González-Salamanca dkk., 2020). Meskipun demikian, integrasi sistematis antara etnosains, SSI, dan inkuiri berbasis proyek masih terbatas, sehingga menghambat pengembangan Literasi Lingkungan Berkelanjutan di perguruan tinggi (Zeidler dkk., 2005; Levinson, 2018).

Terlepas dari meningkatnya minat terhadap pendidikan sains yang berorientasi pada keberlanjutan, penelitian lintas budaya mengenai model pembelajaran integratif masih terbatas, khususnya di Asia Tenggara—kawasan yang memiliki kekayaan keanekaragaman hayati, tradisi budaya yang beragam, dan sistem pengetahuan masyarakat adat yang luas. Negara-negara seperti Indonesia dan Malaysia menyediakan konteks autentik untuk pembelajaran keberlanjutan karena keduanya berbagi sumber daya ekologis dan warisan budaya, namun tetap mempertahankan perspektif sosial-budaya yang khas terkait praktik lingkungan (Muñoz-Saavedra dkk., 2020). Akan tetapi, studi yang ada sebagian besar mengkaji pendidikan keberlanjutan dalam satu latar budaya saja, sehingga memberikan wawasan terbatas mengenai bagaimana perspektif lintas budaya dapat memperkaya pemahaman siswa tentang hubungan antara sains, budaya, dan keberlanjutan. Keterbatasan ini menghambat pengembangan lingkungan pembelajaran yang mampu menumbuhkan Literasi Lingkungan Berkelanjutan (SEL) yang responsif secara budaya dan relevan secara global. Oleh karena itu, diperlukan sebuah model pembelajaran yang secara eksplisit mengintegrasikan inkuiri berbasis proyek, etnosains, dan isu sosial-ilmiah (SSI) dalam kerangka lintas budaya guna mendorong pengalaman belajar yang lebih bermakna, kontekstual, dan berorientasi pada keberlanjutan.

Meskipun minat terhadap pendidikan sains yang berorientasi pada keberlanjutan terus meningkat, penelitian lintas budaya mengenai model pembelajaran integratif masih terbatas, khususnya di Asia Tenggara—kawasan yang memiliki kekayaan keanekaragaman hayati, tradisi budaya yang beragam, serta sistem pengetahuan adat yang luas. Negara-negara seperti Indonesia dan Malaysia menyediakan konteks autentik untuk pembelajaran keberlanjutan karena keduanya berbagi sumber daya ekologis dan warisan budaya, namun tetap mempertahankan perspektif sosial-budaya yang khas terkait praktik lingkungan (Muñoz-Saavedra et al., 2020). Akan tetapi, studi yang ada sebagian besar mengkaji pendidikan keberlanjutan dalam satu latar budaya saja, sehingga memberikan wawasan terbatas mengenai bagaimana perspektif lintas budaya dapat memperkaya pemahaman siswa tentang hubungan antara sains, budaya, dan keberlanjutan. Keterbatasan ini menghambat pengembangan lingkungan pembelajaran yang mampu menumbuhkan Literasi Lingkungan Berkelanjutan (SEL) yang responsif secara budaya dan relevan secara global. Oleh karena itu, diperlukan sebuah model pembelajaran yang secara eksplisit mengintegrasikan inkuiri berbasis proyek, etnosains, dan isu sosial-ilmiah (SSI) dalam kerangka kerja lintas budaya guna mendorong pengalaman belajar yang lebih bermakna, kontekstual, dan berorientasi pada keberlanjutan.

Integrasi antara etnosains, isu sosial-ilmiah (SSI), dan inkuiri berbasis proyek dalam model pembelajaran lintas budaya yang komprehensif masih terbatas. Selain itu,

studi yang secara bersamaan menggabungkan pendekatan-pendekatan tersebut dalam kerangka Design-Based Research (DBR) dan memvalidasinya melalui Structural Equation Modeling (SEM) masih jarang ditemukan, khususnya dalam konteks lintas budaya (McKenney & Reeves, 2019; Saleh et al., 2020). Untuk mengatasi kesenjangan ini, penelitian ini mengembangkan model integratif Ethno-SSI yang memadukan inkuiri berbasis proyek dan pembelajaran lintas budaya, serta didukung oleh validasi empiris menggunakan DBR dan SEM dalam konteks kearifan lokal yang autentik. Penelitian ini diperkuat lebih lanjut melalui kajian terhadap makanan dan minuman berbasis rempah menggunakan sensor gas berbasis Arduino, analisis organoleptik dan hedonik (Lawless & Heymann, 2010), serta rekonstruksi pengetahuan berbantuan Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence) untuk mengintegrasikan data sensor, karakteristik kimia, dan pemahaman konseptual dalam pembelajaran sains (Zawacki-Richter et al., 2019).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang sebagian besar mengkaji etnosains, isu sosiosaintifik (SSI), Virtual Reality (VR), dan pembelajaran berbasis proyek sebagai pendekatan terpisah dalam intervensi jangka pendek yang didominasi orientasi STEM, penelitian ini mengusulkan model MPI Ethno-SSI lintas budaya. Model ini mengintegrasikan etnosains, SSI, VR, dan inkuiri berbasis proyek dalam konteks autentik Indonesia-Malaysia. Model tersebut memperluas cakupan penelitian yang ada dengan mengaitkan pembelajaran yang berakar pada budaya dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) dan Literasi Lingkungan Berkelanjutan (SEL), serta melampaui fokus tradisional pada hasil kognitif dan literasi sains umum (Sudarmin dkk., 2018; Sudarmin dkk., 2020). Integrasi ini diwujudkan melalui eksplorasi makanan dan minuman lokal berbasis rempah—seperti nasi lemak, teh tarik, rendang, dan wedang uwuh—yang mencerminkan pengetahuan lokal, pemanfaatan sumber daya secara berkelanjutan, serta nilai-nilai pelestarian keanekaragaman hayati yang terkait dengan SDG 3, SDG 12, dan SDG 15 (FAO, 2019; Tilman & Clark, 2014; Willett dkk., 2019). Konteks yang relevan secara budaya seperti ini terbukti dapat meningkatkan keterlibatan siswa (González-Salamanca dkk., 2020), memperkuat keterampilan berpikir kritis dan pengambilan keputusan (Zeidler dkk., 2005; Levinson, 2018), serta menumbuhkan keterampilan berpikir tingkat tinggi dan kompetensi keberlanjutan (Chen & Yang, 2019; Muñoz-Saavedra dkk., 2020). Dengan demikian, model MPI Ethno-SSI menyediakan kerangka kerja komprehensif untuk mengintegrasikan sains, budaya, dan keberlanjutan guna memperkuat Literasi Lingkungan Berkelanjutan di perguruan tinggi..

Studi ini berfokus pada integrasi pendekatan Ethno-SSI ke dalam pembelajaran inkuiri berbasis proyek melalui kerangka kerja lintas budaya Indonesia-Malaysia untuk mendorong Literasi Lingkungan Berkelanjutan (Sustainability Environmental Literacy atau SEL). Integrasi ini menggabungkan etnosains dan isu sosiosaintifik (Socio-Scientific Issues atau SSI) dalam konteks autentik yang bersumber dari makanan dan minuman lokal berbasis rempah—seperti nasi lemak, teh tarik, rendang, dan wedang uwuh—yang merepresentasikan pengetahuan lokal dan nilai-nilai keberlanjutan. Konteks-konteks tersebut memiliki keterkaitan erat dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals atau SDGs), khususnya SDG 3 (Kehidupan Sehat dan Sejahtera), SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab), dan SDG 15 (Ekosistem Daratan), karena mencerminkan pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan, penggunaan bahan alami, serta pelestarian keanekaragaman hayati (FAO, 2019; Tilman & Clark, 2014; Willett dkk., 2019). Dengan demikian, integrasinya ke dalam pembelajaran sains tidak hanya memperkuat pemahaman ilmiah, tetapi juga menumbuhkan kesadaran ekologis dan perilaku berkelanjutan. Lebih lanjut,

pembelajaran lintas budaya memperkaya pemahaman siswa mengenai keterkaitan antara sains, budaya, dan lingkungan. Studi-studi sebelumnya menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis konteks lokal meningkatkan keterlibatan siswa (González-Salamanca dkk., 2020), SSI memperkuat kemampuan berpikir kritis dan pengambilan keputusan (Zeidler dkk., 2005; Levinson, 2018), serta inkuiri berbasis proyek mendorong keterampilan berpikir tingkat tinggi dan kompetensi keberlanjutan (Chen & Yang, 2019; Muñoz-Saavedra dkk., 2020). Secara keseluruhan, elemen-elemen ini memberikan landasan yang kuat bagi pengembangan Literasi Lingkungan Berkelanjutan di perguruan tinggi.

Research on the integration of ethnoscience in project-based learning (Rusmansyah et al., 2023), penerapan isu sosio-saintifik (SSI) dalam kerangka pembelajaran berorientasi SDG (Solihin dkk., 2025), serta penggunaan Virtual Reality (VR) untuk meningkatkan keterlibatan siswa (Verawati dkk., 2024) telah berkembang pesat. Namun, integrasi pendekatan-pendekatan tersebut dalam model inkuiri berbasis proyek lintas budaya masih terbatas dan jarang didukung oleh metodologi pengembangan serta validasi yang ketat, seperti Design-Based Research (DBR) dan Structural Equation Modeling (SEM) (Husamah dkk., 2024). Untuk mengatasi kesenjangan ini, penelitian ini mengembangkan Model Pembelajaran Inkuiri Ethno-SSI Terintegrasi (MPI Ethno-SSI), yang memadukan etnosains, SSI, inkuiri berbasis proyek, serta konteks lintas budaya Indonesia-Malaysia. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi DBR dan SEM, yang diperkaya dengan data empiris berbasis sensor dan rekonstruksi pengetahuan berbantuan Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence) untuk mendukung pengembangan Literasi Lingkungan Berkelanjutan (Sustainability Environmental Literacy atau SEL). Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengembangkan dan memvalidasi model MPI Ethno-SSI, (2) mengevaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan Literasi Lingkungan Berkelanjutan siswa, dan (3) mengkaji hubungan antara integrasi Ethno-SSI, keterlibatan dalam inkuiri, dan Literasi Lingkungan Berkelanjutan menggunakan Structural Equation Modeling.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan Design-Based Research (DBR) untuk mengembangkan, mengimplementasikan, dan mengevaluasi Model Pembelajaran Inkuiri Terintegrasi Ethno-SSI (MPI Ethno-SSI) guna meningkatkan literasi lingkungan berkelanjutan siswa. Penelitian ini terdiri dari tiga tahap. Tahap pertama, analisis dan desain, mencakup identifikasi kebutuhan pembelajaran serta perancangan model inkuiri berbasis proyek yang mengintegrasikan etnosains, isu sosiosaintifik (SSI), dan konteks lintas budaya Indonesia-Malaysia. Tahap kedua, pengembangan dan implementasi, meliputi pengembangan dan validasi ahli terhadap perangkat pembelajaran, diikuti dengan penerapan model MPI Ethno-SSI dalam format pembelajaran campuran (blended learning) selama delapan sesi pembelajaran. Tahap ketiga, evaluasi dan penyempurnaan, berfokus pada penilaian efektivitas model serta revisi desain berdasarkan bukti empiris dan masukan pemangku kepentingan (Reeves, 2006; Wang & Hannafin, 2005). Sepanjang proses tersebut, siklus DBR menekankan pada desain, implementasi, refleksi, dan perbaikan yang bersifat iteratif guna memastikan validitas dan keterterapan model dalam lingkungan pembelajaran yang autentik. Data dikumpulkan melalui lembar

observasi, kuesioner, dan tes, kemudian dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dan kuantitatif untuk mendukung validasi serta penyempurnaan model.

Peserta penelitian terdiri dari 25 mahasiswa pendidikan sains dari universitas mitra di Indonesia dan Malaysia, yang dipilih secara purposif untuk mewakili konteks pembelajaran lintas budaya. Data dikumpulkan menggunakan berbagai instrumen, meliputi lembar observasi untuk menilai penerapan model, kuesioner untuk mengukur keterlibatan dan persepsi mahasiswa, tes Literasi Lingkungan Berkelanjutan (Sustainability Environmental Literacy) untuk mengevaluasi dimensi kognitif, afektif, dan perilaku, serta formulir validasi ahli untuk menguji kelayakan dan validitas model yang diusulkan.

Data dianalisis menggunakan pendekatan metode campuran yang menggabungkan teknik kualitatif dan kuantitatif. Analisis kualitatif dilakukan untuk mengevaluasi proses penerapan, respons mahasiswa, dan faktor-faktor kontekstual yang memengaruhi model MPI Ethno-SSI. Analisis kuantitatif menggunakan Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) untuk menguji hubungan antara integrasi Ethno-SSI, keterlibatan dalam inkuiri, dan Literasi Lingkungan Berkelanjutan melalui penilaian model pengukuran dan model struktural. Selain itu, Principal Component Analysis (PCA) diterapkan pada data organoleptik produk rempah-rempah Indonesia dan Malaysia—termasuk wedhang uwuh, kayu manis, bumbu rendang, bumbu kari, *Lasia spinosa*, dan *Syzygium polyanthum*—untuk mengidentifikasi pola sensoris dan atribut utama yang berkontribusi terhadap diferensiasi produk. Standar etika dijaga melalui prosedur persetujuan setelah penjelasan (informed consent) dan perolehan persetujuan institusional sebelum pelaksanaan penelitian.

Hasil dan Pembahasan

Eksplorasi, Elaborasi, dan Rekonstruksi Pengetahuan

Tahap eksplorasi mengungkap pengetahuan etnosains mengenai rempah-rempah di Indonesia dan Malaysia, baik yang bersifat umum maupun spesifik konteks. Kayu manis, bumbu rendang, bumbu kari, bahan wedang uwuh, *Lasia spinosa*, dan *Syzygium polyanthum* secara konsisten dipandang sebagai sumber daya berharga bagi kesehatan, pelestarian budaya, pengembangan ekonomi, dan pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan (Fauziyyah dkk., 2025; Setyowati dkk., 2023). Namun, variasi dalam pola pemanfaatan dan makna budaya mencerminkan konteks sosial-budaya dan ekologis yang khas, sehingga menyoroti potensi pengetahuan lokal berbasis rempah sebagai konteks pembelajaran Ethno-SSI yang autentik.

Tahap elaborasi menunjukkan bahwa persepsi masyarakat melampaui sekadar manfaat rempah, mencakup pula isu-isu sosial-ilmiah seperti konsumsi berlebihan, interaksi dengan pengobatan modern, kualitas produk, fluktuasi pasar, dan kelestarian lingkungan. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengetahuan etnosains terus dinegosiasikan melalui interaksi antara bukti ilmiah, nilai-nilai budaya, dan kebutuhan masyarakat, yang membuka peluang bagi penyelidikan kritis dan penalaran berbasis bukti.

Rekonstruksi pengetahuan dicapai melalui kerangka analisis pro-kontra yang menyintesis data observasi dan wawancara dari 25 responden. Proses ini memungkinkan siswa untuk mengevaluasi bukti, membandingkan berbagai perspektif, dan menyusun argumen yang berdasar kuat mengenai dimensi kesehatan, budaya, ekonomi, dan lingkungan dari pemanfaatan rempah. Dengan demikian, kerangka kerja Ethno-SSI memperkuat penalaran sosial-ilmiah dan literasi lingkungan berkelanjutan

dengan mendorong keterlibatan kritis terhadap keterkaitan antara sains, budaya, dan keberlanjutan. Hasil dari proses eksplorasi dan elaborasi tersebut disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Perbandingan Etno-SSI terhadap Produk Berbasis Rempah dari Indonesia dan Malaysia

Produk	Dimensi	Manfaat dan Bukti Ilmiah	Tantangan dan Kekhawatiran Sosio-Sains
Wedhang Uwuh	Perspektif Kesehatan	Meningkatkan fungsi kekebalan tubuh, sirkulasi darah, dan aktivitas antioksidan melalui senyawa bioaktif dalam jahe, kayu secang, dan cengkih (Fauziyyah dkk., 2025).	Asupan berlebihan dapat menyebabkan iritasi lambung dan interaksi obat akibat senyawa gingerol dan shogaol (Modi et al., 2024).
	Rekonstruksi Ilmiah	Kaya akan brazilin, flavonoid, tanin, dan senyawa fenolik yang memiliki aktivitas antioksidan dan antimikroba.	Pemanasan dan penyimpanan dapat mengurangi stabilitas senyawa bioaktif (Jiang et al., 2025).
Campuran Bumbu Rendang	Perspektif Kesehatan	Kaya akan kurkumin, alisin, dan minyak atsiri dengan sifat antioksidan dan anti-inflamasi.	HKadar santan dan lemak jenuh yang tinggi dapat meningkatkan risiko kesehatan metabolik.
	Rekonstruksi Ilmiah	Reaksi Maillard dan senyawa volatil menghasilkan aroma dan cita rasa khas rendang.	Pemanasan yang berkepanjangan dapat mengurangi stabilitas senyawa fenolik dan senyawa volatil.
Campuran Rempah Kari Malaysia	Perspektif Kesehatan	Mendukung metabolisme, pencernaan, dan aktivitas antioksidan melalui kunyit, jintan, ketumbar, dan rempah-rempah lainnya.	Dapat menyebabkan ketidaknyamanan saluran pencernaan pada individu yang sensitif.
	Rekonstruksi Ilmiah	Mengandung terpenoid, senyawa fenolik, dan aldehida yang memiliki sifat aromatik dan antimikroba.	Variasi penyimpanan dan formulasi dapat memengaruhi stabilitas dan kualitas aroma.

Tahap elaborasi menghubungkan temuan etnosains dengan bukti ilmiah melalui analisis kritis terhadap literatur dan sumber daya digital. Pengetahuan lokal mengenai rempah-rempah difafsirkan ulang secara ilmiah melalui identifikasi senyawa bioaktif—seperti alkaloid, flavonoid, terpenoid, dan fenolik (misalnya piperin, eugenol, gingerol, dan kurkumin)—yang menunjukkan aktivitas antioksidan, antimikroba, dan anti-

inflamasi (Fauziyyah dkk., 2025; Setyowati dkk., 2023). Proses ini menunjukkan bahwa pengetahuan lokal memiliki landasan bukti dan menjadi dasar bagi penalaran kritis serta pengambilan keputusan berbasis bukti dalam kerangka kerja Ethno-SSI. Tahap rekonstruksi pengetahuan mengintegrasikan temuan ilmiah dengan perspektif sosial-budaya dengan mengkaji manfaat maupun tantangan pemanfaatan rempah, termasuk risiko kesehatan, interaksi obat, penurunan kualitas, fluktuasi ekonomi, dan isu keberlanjutan. Proses ini mengubah pengetahuan tradisional menjadi konsep yang tervalidasi secara ilmiah sembari tetap mempertahankan relevansi budayanya, selaras dengan pembelajaran berbasis etnosains yang mendorong integrasi antara kearifan lokal dan pengetahuan ilmiah (Sudarmin dkk., 2019; Sudarmin dkk., 2020). Dengan demikian, pengetahuan mengenai rempah direkonstruksi dalam konteks yang lebih luas, mencakup ketahanan pangan, pelestarian keanekaragaman hayati, dan pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan. Konsep-konsep hasil rekonstruksi ini kemudian menjadi acuan dalam pengembangan media pembelajaran berbasis Virtual Reality (VR) mengenai rendang, wedang uwuh, dan kayu manis.



Source:

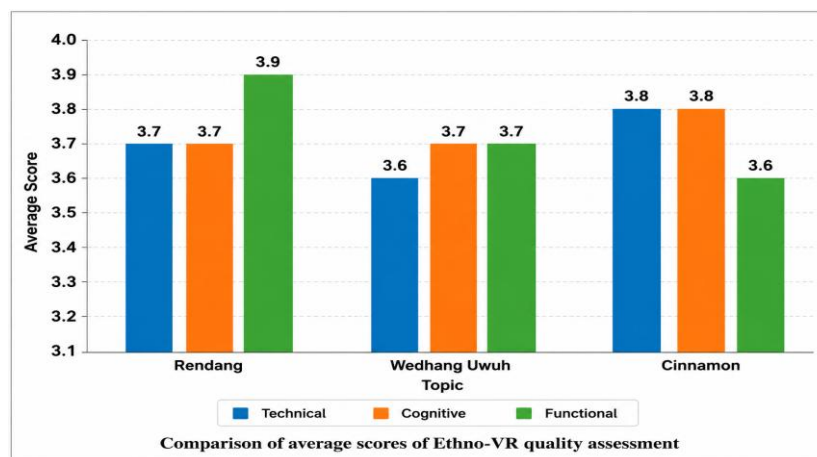
Gambar 2. Kerangka Pengembangan dan Tampilan Museum Virtual Reality Cinnamon

<https://www.youtube.com/watch?v=8PlBdXyecDs>

Gambar 2 menampilkan Cinnamon Virtual Gallery Museum, sebuah lingkungan berbasis VR yang mengintegrasikan pengetahuan lokal, sains, dan teknologi melalui kerangka kerja Ethno-SSI.

Hasil pengembangan media VR

Media VR yang dikembangkan dalam penelitian ini berfokus pada rendang, wedhang uwuh, dan kayu manis. Kualitasnya dievaluasi berdasarkan tiga dimensi: aspek teknis, kognitif, dan fungsional. Aspek teknis berkaitan dengan kinerja sistem, imersi, kegunaan, dan stabilitas perangkat lunak, yang memengaruhi kepuasan serta penerimaan pengguna (Elwardy dkk., 2024; Ramasari-Chandra & Reza, 2024). Aspek kognitif mencerminkan kemampuan VR dalam meningkatkan keterlibatan, pemrosesan informasi, dan pemahaman konseptual melalui pengalaman belajar yang imersif (Chandrasiri dkk., 2025; Ribeiro dkk., 2024). Aspek fungsional mengacu pada interaksi yang bermakna, dukungan terhadap tugas, dan relevansi kontekstual yang berkontribusi pada efektivitas pembelajaran (Kong & Liu, 2019). Hasil perbandingan penilaian kualitas Ethno-VR pada dimensi-dimensi tersebut disajikan dalam Gambar 2.



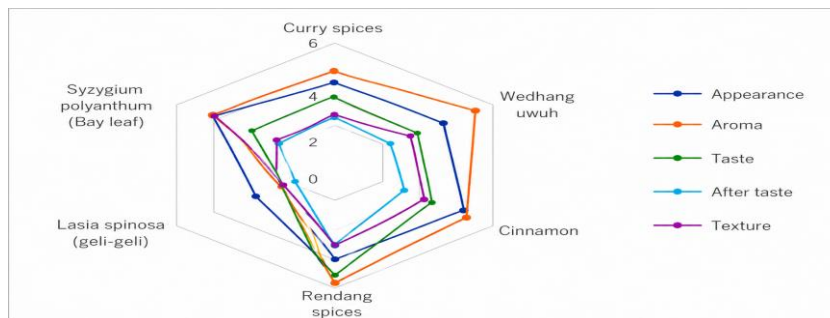
Gambar 2. Perbandingan skor rata-rata penilaian kualitas Ethno-VR

Gambar 2 menunjukkan bahwa media Ethno-VR yang dikembangkan untuk topik rendang, wedhang uwuh, dan kayu manis memperoleh skor tinggi yang konsisten pada dimensi teknis, kognitif, dan fungsional ($\geq 3,5$), yang mengonfirmasi validitas dan kesesuaiannya untuk pembelajaran. Skor yang relatif seimbang di berbagai dimensi tersebut mengindikasikan keberhasilan media dalam memadukan kinerja teknologi dengan fungsionalitas pedagogis. Variasi antar-modul menunjukkan bahwa setiap konteks budaya memberikan kontribusi yang berbeda terhadap pengalaman peserta didik; misalnya, aspek fungsional lebih menonjol pada modul rendang karena keterkaitannya yang kuat dengan praktik kuliner autentik, sedangkan modul kayu manis menunjukkan kinerja teknis dan kognitif yang lebih kuat, yang mencerminkan efektivitasnya dalam mendukung visualisasi imersif dan pemahaman konseptual. Temuan ini mengindikasikan bahwa kualitas Ethno-VR tidak hanya ditentukan oleh fitur teknologi, tetapi juga oleh sejauh mana konteks budaya direpresentasikan secara bermakna dalam lingkungan pembelajaran.

Hasil validasi yang tinggi juga menunjukkan bahwa media Ethno-VR secara efektif mengimplementasikan kerangka kerja Ethno-SSI dengan menghubungkan konsep ilmiah, pengetahuan lokal, dan isu keberlanjutan dalam pengalaman pembelajaran yang imersif. Temuan ini mendukung penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa VR meningkatkan hasil belajar ketika kinerja teknis, potensi kognitif (cognitive affordances), dan desain fungsional selaras dengan tujuan pedagogis (Makransky & Petersen, 2019; Radianti dkk., 2020). Lebih penting lagi, integrasi isu sosio-saintifik dan konteks budaya memungkinkan peserta didik untuk mengevaluasi bukti secara kritis, menelaah berbagai perspektif, dan menyusun penilaian yang berdasar terkait tantangan kesehatan, lingkungan, dan keberlanjutan. Pengalaman pembelajaran semacam itu sangat penting untuk menumbuhkan literasi sains, penalaran kritis, dan literasi lingkungan berkelanjutan, khususnya dalam pendidikan sains yang berupaya menjembatani pengetahuan ilmiah dengan konteks budaya dan lingkungan di dunia nyata (Georgiou dkk., 2020; Owens & Sadler, 2024; Sandoval-Rivera, 2020).

Temuan Uji Organoleptik

Hasil uji organoleptik sampel (a) kayu manis, (b) wedhang uwuh, (c) bumbu rendang, (d) bumbu kari, (e) Lasia spinosa (geli-geli), dan (f) Syzygium polyanthum (daun salam) disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan skor karakteristik sensoris berdasarkan hasil uji organoleptik.

Gambar 3 memperlihatkan profil sensoris yang khas di antara produk rempah yang dievaluasi. Bumbu rendang memperoleh skor tertinggi, khususnya pada aspek aroma, rasa, dan aftertaste (sensasi rasa yang tertinggal), yang menunjukkan kompleksitas sensoris yang unggul; sementara itu, wedhang uwuh dan kayu manis dicirikan oleh atribut aroma dan aftertaste yang kuat. Bumbu kari menunjukkan profil sensoris yang seimbang di semua dimensi, sedangkan Lasia spinosa dan Syzygium polyanthum menunjukkan tingkat penerimaan yang relatif lebih rendah pada atribut-atribut tertentu. Variasi ini mencerminkan perbedaan dalam komposisi fitokimia, metode pengolahan, dan fungsi kuliner dari setiap produk rempah tersebut.

Kualitas sensoris yang unggul pada bumbu rendang dapat dikaitkan dengan efek sinergis dari beragam komponen rempah serta proses pemasakan yang lama yang meningkatkan pengembangan cita rasa (Nazir dkk., 2018; Syukri dkk., 2024). Demikian

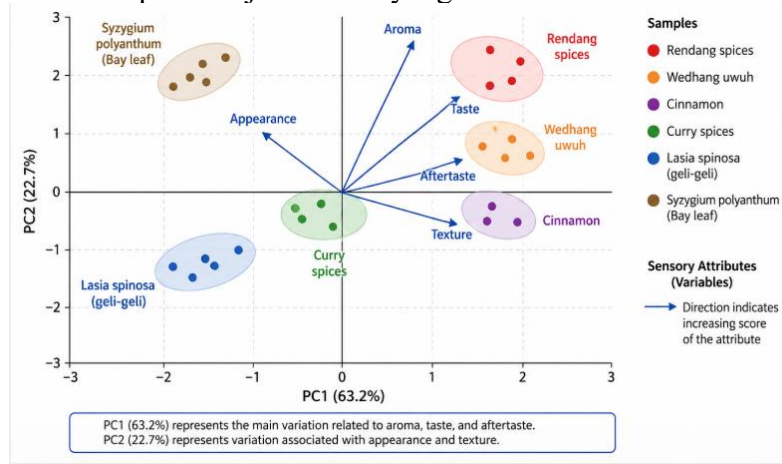
pula, karakteristik sensori yang baik pada wedhang uwuh, kayu manis, dan bumbu kari berkaitan dengan senyawa volatil dan komponen bioaktif yang berkontribusi terhadap aroma, rasa, dan penerimaan konsumen (Juanda dkk., 2025; Ma dkk., 2024; Patriani dkk., 2024; Sari dkk., 2025; Sriharti dkk., 2022). Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan rempah tradisional didasarkan pada sifat-sifat sensori yang telah dioptimalkan secara empiris dan dapat dikaji secara sistematis melalui penyelidikan ilmiah. Dalam kerangka Ethno-SSI, integrasi antara evaluasi sensori dan bukti fitokimia memberikan konteks yang bermakna untuk mengembangkan literasi ilmiah, penalaran berbasis bukti, dan literasi lingkungan berkelanjutan, sekaligus memperkuat pemahaman siswa mengenai isu-isu kualitas pangan, kesehatan, dan keberlanjutan yang relevan dengan SDGs (Ma dkk., 2024; Nazir dkk., 2018; Syukri dkk., 2024).

Interpretasi Analisis Komponen Utama (PCA)

Profil sensori yang disajikan pada Gambar 7 menunjukkan perbedaan yang jelas di antara produk rempah yang dievaluasi, yang mengindikasikan potensi terbentuknya klaster-klaster berbeda dalam Analisis Komponen Utama (PCA). PCA banyak digunakan untuk mereduksi data sensori multidimensi dan mengidentifikasi atribut yang paling kuat berkontribusi terhadap perbedaan sampel (Jolliffe & Cadima, 2016; Granato dkk., 2018). Bumbu rendang diperkirakan akan menempati posisi terpisah dari sampel lainnya karena skor yang secara konsisten tinggi pada aspek aroma, rasa, dan aftertaste (rasa yang tertinggal), yang mencerminkan kompleksitas sensori yang unggul. Wedhang uwuh dan kayu manis mungkin membentuk klaster yang berdekatan, yang dicirikan oleh atribut aroma dan aftertaste yang dominan, sedangkan bumbu kari kemungkinan besar akan menempati posisi sentral karena profil sensorinya yang relatif seimbang di semua dimensi yang dievaluasi.

Sebaliknya, *Lasia spinosa* (geli-geli) diperkirakan akan dikaitkan dengan skor rasa dan tekstur yang lebih rendah, sehingga terpisah dari produk rempah yang lebih disukai. *Syzygium polyanthum* (daun salam) mungkin dapat dibedakan melalui atribut tampilan dan aroma yang kuat, namun menunjukkan performa moderat pada dimensi sensori lainnya. Pola-pola ini menunjukkan bahwa aroma, rasa, dan aftertaste merupakan atribut utama yang berkontribusi terhadap perbedaan sensori antar-sampel; hal ini sejalan dengan studi sensori sebelumnya yang menunjukkan bahwa senyawa volatil dan konstituen aktif pembentuk cita rasa merupakan faktor penentu utama penerimaan konsumen dan diferensiasi produk (Lawless & Heymann, 2010; Granato dkk., 2018). Dari perspektif Ethno-SSI, struktur PCA menyoroti bagaimana produk rempah tradisional memiliki identitas sensori khas yang dapat dijelaskan secara ilmiah melalui perbedaan komposisi fitokimia, metode pengolahan, dan praktik pemanfaatan secara budaya (Nazir dkk., 2018; Syukri dkk., 2024). Dengan demikian, integrasi antara pembuatan profil sensori dan PCA memberikan konteks autentik untuk mengembangkan literasi ilmiah, penalaran berbasis bukti, dan literasi lingkungan

berkelanjutan dalam pembelajaran sains yang dikontekstualisasikan secara budaya.



Gambar 4. Biplot PCA hipotetis yang menunjukkan pengelompokan produk berbasis rempah berdasarkan atribut sensori (penampilan, aroma, rasa, aftertaste, dan tekstur).

Pola pengelompokan yang khas menunjukkan bahwa aroma, rasa, dan sensasi rasa yang tertinggal (aftertaste) merupakan atribut dominan yang menentukan perbedaan sensori di antara produk berbasis rempah yang dievaluasi.

Pengaruh Media VR Berbasis Ethno-SSI terhadap Literasi SDGs, Literasi Sains dan Teknologi, serta Pemahaman Konseptual

Sebelum melakukan analisis statistik inferensial, uji normalitas dilakukan untuk memeriksa karakteristik distribusi data yang diperoleh dari pelaksanaan proyek inkuiri Ethno-SSI dan pembelajaran Virtual Reality (VR) berbasis konteks rempah-rempah Indonesia dan Malaysia. Penilaian ini dilakukan terhadap variabel literasi SDGs, literasi sains dan teknologi, serta pemahaman konseptual guna memastikan kesesuaian untuk analisis parametrik tahap selanjutnya. Hasil uji normalitas tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Normalitas Hasil Belajar dalam Proyek Inkuiri Ethno-SSI Menggunakan Konteks Rempah-rempah Indonesia dan Malaysia

Variabel	Grup	Sig. (p)	Deskripsi
Pemahaman Konseptual	Eksperimen	0.061	Data terdistribusi secara normal
	Kontrol	0.200	Data terdistribusi secara normal
Literasi SDGs bidang Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan	Eksperimen	0.152	Data terdistribusi secara normal
	Kontrol	0.068	Data terdistribusi secara normal

Variabel	Grup	Sig. (p)	Deskripsi
Literasi Sains, Lingkungan, dan Teknologi	Eksperimen	0.200	Data terdistribusi secara normal
	Kontrol	0.089	Data terdistribusi secara normal

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2, seluruh nilai signifikansi melebihi 0,05, yang mengindikasikan bahwa data mengenai Literasi SDGs (Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan), Literasi Sains, Lingkungan, dan Teknologi, serta Pemahaman Konseptual telah memenuhi asumsi normalitas. Setelah memenuhi prasyarat tersebut, uji Box's M kemudian dilakukan untuk menilai homogenitas matriks kovarians antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Hasil uji Box's M disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Penilaian Homogenitas Matriks Kovarians Menggunakan Uji Box's M sebelum MANOVA

Assumption test		Statistic	Value	Sig. (p)
Box's Test of Equality of Covariance Matrices	of Box's of M	4.682	0.208	

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3, Uji Box's M menghasilkan nilai sebesar 4,682 dengan tingkat signifikansi 0,208 ($p > 0,05$). Hasil ini menunjukkan bahwa matriks kovarians untuk Literasi SDGs (Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan), Literasi Sains, Lingkungan, dan Teknologi, serta Pemahaman Konseptual bersifat homogen antar-kelompok. Dengan demikian, asumsi yang diperlukan untuk analisis multivariat selanjutnya telah terpenuhi, yang mengonfirmasi kelayakan untuk melakukan pengujian hipotesis lebih lanjut.

Tabel 4. Hasil Uji Levene untuk Homogenitas Varians Galat antara Kelompok Eksperimen dan Kelompok Kontrol

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Pemahaman konseptual	Berdasarkan Rata-rata	.018	1	58	.893
Literasi SDGs	Berdasarkan Rata-rata	1.830	1	58	.181
Literasi Sains dan Teknologi	Berdasarkan Rata-rata	3.712	1	58	.059

Hasil uji Levene menunjukkan bahwa seluruh variabel dependen memiliki nilai signifikansi lebih besar dari 0,05 ($p > 0,05$), yang mengonfirmasi homogenitas varians antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Temuan ini menunjukkan bahwa variabilitas dalam Literasi SDGs (bidang Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan), Literasi Sains-Teknologi (Literasi Sains, Lingkungan, dan Teknologi), serta Pemahaman Konseptual adalah setara antar-kelompok, sehingga memenuhi asumsi dasar untuk

analisis multivariat. Pemenuhan asumsi ini memperkuat ketangguhan inferensi statistik selanjutnya dengan mengurangi kemungkinan bahwa perbedaan antar-kelompok yang teramati disebabkan oleh struktur varians yang tidak setara, alih-alih oleh intervensi instruksional itu sendiri.

Setelah memenuhi asumsi normalitas, homogenitas kovarians, dan homogenitas varians galat, analisis Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) dilakukan untuk menguji pengaruh gabungan dari pembelajaran inkuiri berbasis VR dan pendekatan Ethno-SSI terhadap ketiga variabel hasil. MANOVA dianggap tepat karena Literasi SDGs, Literasi Scienteck, dan Pemahaman Konseptual merupakan dimensi pembelajaran berorientasi keberlanjutan yang saling terkait, bukan hasil pendidikan yang berdiri sendiri. Menguji variabel-variabel ini secara simultan memberikan penilaian yang lebih komprehensif terhadap model pembelajaran tersebut dengan menangkap perkembangan yang saling terhubung antara pemahaman ilmiah, kesadaran lingkungan, kompetensi teknologi, dan penalaran berorientasi keberlanjutan. Hasil MANOVA menunjukkan adanya pengaruh multivariat yang signifikan dari kelompok pembelajaran terhadap gabungan variabel dependen, yang mencakup Literasi SDGs (bidang Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan), Literasi Scienteck, serta Pemahaman Konseptual (Wilks' $\Lambda = 0,702$; $F(3,56) = 7,919$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,298$). Besaran pengaruh (effect size) tersebut mengindikasikan bahwa sekitar 29,8% varians dalam gabungan hasil pembelajaran dijelaskan oleh intervensi pembelajaran tersebut. Temuan ini menunjukkan bahwa pembelajaran inkuiri berbasis VR dan pendekatan Ethno-SSI memberikan pengaruh yang substansial terhadap kompetensi berorientasi keberlanjutan dan pemahaman konseptual siswa. Hasil uji multivariat secara rinci disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Efek Univariat Pembelajaran Inkuiri VR Berbasis Ethno-SSI terhadap Literasi SDGs, Literasi Scienteck, dan Pemahaman Konseptual

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Grup	Pemahaman_konseptual	90.55	1	90.55	1.292	.260	.022
	Literasi SDGs bidang Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan	1538.85	1	1538.852	17.654	.000	.233
	Literasi Scienteck (Literasi Sains, Lingkungan, dan Teknologi)	2.25	1	2.247	.019	.889	.000

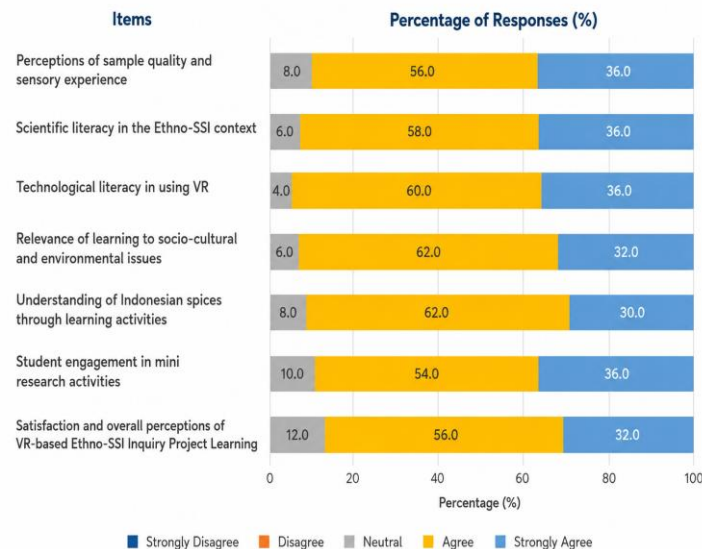
Tabel 5 menunjukkan bahwa pembelajaran inkuiri berbasis VR dengan pendekatan Ethno-SSI secara signifikan meningkatkan literasi SDGs terkait pendidikan, kesehatan, dan lingkungan ($F = 17,654$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,233$), yang mengindikasikan bahwa 23,3% varians dijelaskan oleh intervensi tersebut. Temuan ini menyiratkan bahwa integrasi isu

sosio-saintifik, konteks rempah lokal, dan pengalaman VR yang imersif secara efektif memperkuat kesadaran serta pemahaman siswa mengenai keberlanjutan melalui keterlibatan autentik dengan isu-isu kesehatan, lingkungan, dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan (Owens & Sadler, 2024; Sandoval-Rivera, 2020). Sebaliknya, tidak ditemukan dampak yang signifikan terhadap Pemahaman Konseptual ($F = 1,292$; $p = 0,260$; $\eta^2 = 0,022$) maupun Literasi Sains-Teknologi ($F = 0,019$; $p = 0,889$; $\eta^2 = 0,000$). Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun pembelajaran Ethno-SSI efektif dalam mendorong literasi yang berorientasi pada keberlanjutan, peningkatan penguasaan konsep dan literasi sains-lingkungan-teknologi mungkin memerlukan periode intervensi yang lebih lama, pengalaman inkuiri yang berulang, serta dukungan konseptual (scaffolding) yang lebih eksplisit (Georgiou dkk., 2020; Makransky & Petersen, 2019; Radianti dkk., 2020).

Respons mahasiswa terhadap perkuliahan yang menggunakan virtual reality berbasis proyek inkuiri etno-SSI.

Respons siswa menunjukkan tingkat persetujuan yang tinggi dan konsisten pada semua indikator, yang mencerminkan penerimaan kuat terhadap pembelajaran inkuiri berbasis VR dengan pendekatan Ethno-SSI. Penilaian positif terhadap kualitas sampel dan pengalaman sensorik mengindikasikan bahwa penggabungan konteks rempah-rempah autentik Indonesia dan Malaysia dengan lingkungan VR yang imersif secara efektif menghubungkan pengamatan sensorik dengan konsep-konsep ilmiah, sehingga mendukung pembelajaran bermakna dan konstruksi konseptual (Makransky & Petersen, 2019; Radianti et al., 2020). Demikian pula, respons positif terhadap Literasi Sains-Teknologi (Scientech Literacy) menunjukkan bahwa VR memfasilitasi penalaran ilmiah, visualisasi fenomena kompleks, dan penggunaan teknologi digital secara terarah dalam pembelajaran (Chandrasiri et al., 2025).

Persepsi-persepsi ini sejalan dengan temuan MANOVA, yang mengungkapkan adanya efek multivariat yang signifikan dari intervensi tersebut terhadap gabungan hasil belajar. Dampak kuat pada literasi SDGs terkait Pendidikan, Kesehatan, dan Lingkungan menunjukkan bahwa lingkungan pembelajaran yang imersif dan memiliki konteks budaya sangat efektif dalam menumbuhkan kesadaran akan keberlanjutan dan penalaran sosiosaintifik. Meskipun dampak langsung terhadap Pemahaman Konseptual dan Literasi Sains-Teknologi tergolong terbatas, temuan ini mengindikasikan bahwa VR terutama berfungsi sebagai perancah (scaffold) kognitif dan motivasional yang meningkatkan keterlibatan, pemaknaan, dan integrasi pengetahuan—yang merupakan landasan penting bagi pengembangan literasi ilmiah dan literasi berorientasi keberlanjutan dalam jangka panjang (Georgiou et al., 2020; Owens & Sadler, 2024; Sandoval-Rivera, 2020).



Gambar 5. Persepsi Siswa terhadap Pembelajaran Inkuiri VR Berbasis Ethno-SSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa siswa memberikan respons positif terhadap pembelajaran inkuiri berbasis VR dengan pendekatan Ethno-SSI, sebagaimana tercermin dari dominasi kategori "setuju" dan "sangat setuju" pada sebagian besar indikator. Penilaian tertinggi diperoleh pada aspek relevansi sosial-budaya dan lingkungan, pemahaman mengenai rempah-rempah Indonesia, serta kepuasan belajar secara keseluruhan; hal ini mengindikasikan bahwa integrasi konteks lokal yang autentik dan lingkungan VR yang imersif secara efektif mendorong pembelajaran yang bermakna dan kontekstual. Persepsi yang tinggi terhadap literasi sains dan teknologi juga menunjukkan bahwa VR mendukung penalaran ilmiah, visualisasi konsep, dan penerapan teknologi digital dalam pembelajaran.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa VR meningkatkan keterlibatan, imersi, dan pengalaman belajar berbasis inkuiri (Makransky dkk., 2019; Verawati & Purwoko, 2024). Respons positif terhadap pembelajaran yang berkaitan dengan SSI juga mengindikasikan bahwa siswa mampu mengaitkan konsep ilmiah dengan isu-isu kesehatan, lingkungan, dan sosial-ekonomi, sehingga memperkuat kesadaran akan keberlanjutan dan pengambilan keputusan berbasis bukti (Kismiati dkk., 2025; Sahabuddin dkk., 2024). Meskipun beberapa siswa memberikan respons netral terkait keterampilan laboratorium dan pemahaman SSI, temuan secara keseluruhan menegaskan potensi pembelajaran VR berbasis Ethno-SSI dalam mendorong literasi sains, teknologi, dan keberlanjutan melalui pengalaman belajar yang kontekstual secara budaya.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan memvalidasi model pembelajaran inkuiri berbasis proyek yang mengintegrasikan pendekatan etno-SSI (etno-sains dan isu sosiosaintifik) dengan landasan kearifan lokal Indonesia-Malaysia dalam konteks makanan dan minuman berbahan dasar rempah. Temuan penelitian menunjukkan bahwa (1) model tersebut memiliki landasan konseptual yang kuat serta relevansi kontekstual

dalam mengintegrasikan inkuiri ilmiah, pengetahuan lokal, dan isu-isu keberlanjutan; (2) penerapan model ini secara efektif meningkatkan keterlibatan siswa dalam inkuiri serta literasi lingkungan berkelanjutan melalui pengalaman belajar sosiosaintifik yang autentik; dan (3) model ini menyediakan kerangka kerja yang bermakna untuk menumbuhkan penalaran yang berorientasi pada keberlanjutan serta pembelajaran sains yang responsif secara budaya di perguruan tinggi. Terlepas dari hasil-hasil positif tersebut, penelitian ini memiliki keterbatasan berupa ukuran sampel yang relatif kecil dan durasi penerapan yang singkat. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengkaji efektivitas jangka panjang dan penerapan model ini dalam cakupan yang lebih luas serta beragam konteks pendidikan.

Pernyataan Mengenai Benturan Kepentingan

Para penulis menyatakan tidak adanya potensi konflik kepentingan terkait dengan penelitian, penulisan, dan/atau publikasi artikel ini.

Pendanaan

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Indonesia melalui Skema Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi tahun 2020/2021, dengan SPK No. 21.23.3/UN37/PPK.3.1/2020.

Daftar Pustaka

- Aikenhead, G. S. (2006). *Science education for everyday life: Evidence-based practice*. Teachers College Press.
- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). Design-based research: A decade of progress in education research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25.
<https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Arifin, Z., Sukarmin, S., & Saputro, S. (2025). Trends and research frontiers in socioscientific issues for sustainable science education: A systematic and bibliometric analysis from 2014–2024. *Journal of Pedagogical Research*, 9(1), 407–434. <https://doi.org/10.33902/JPR.202530575>
- Brundiers, K., Barth, M., Cebrián, G., Cohen, M., Diaz, L., Doucette-Remington, S., Dripps, W., Habron, G., Harré, N., Jarchow, M., Losch, K., Michel, J., Mochizuki, Y., Rieckmann, M., Parnell, R., Walker, P., & Zint, M. (2021). Key competencies in sustainability in higher education. *Sustainability Science*, 16(1), 13–29. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00838-2>
- Bürgener, L., & Barth, M. (2018). Sustainability competencies in teacher education. *Journal of Cleaner Production*, 174, 821–826.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.263>
- Chen, C. H., & Yang, Y. C. (2019). Revisiting the effects of project-based learning on students' academic achievement. *Educational Research Review*, 26, 71–81.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2018.11.001>

- Chiang, S., Chiang, D., Chang, S.-H., & Yao, K.-C. (2025). Innovative virtual reality teaching for sustainable development. *Sustainability*, 17(9), 3945.
<https://doi.org/10.3390/su17093945>
- Dewi, R. K., Rahayu, S., Sumarni, W., Muntholib, M., & Alsulami, N. M. (2025). Socioscientific issues based on local wisdom in science education: A systematic review. *Multidisciplinary Reviews*, 9(5), e2026206.
<https://doi.org/10.31893/multirev.2026206>
- FAO. (2019). *Sustainable healthy diets: Guiding principles*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca6640en>
- Fernández-Huetos, N., et al. (2025). Primary education students' performance in arguing about environmental socioscientific issues. *Sustainability*, 17(4), 1618.
<https://doi.org/10.3390/su17041618>
- Georgiou, Y., Kyza, E. A., & Ioannou, A. (2020). Learning in immersive virtual reality environments: A systematic review. *Educational Technology Research and Development*, 68, 1–34. <https://doi.org/10.1007/s11423-020-09782-0>
- González-Salamanca, J. C., Agudelo, O. L., & Salinas, J. (2020). Key competences for sustainable development and 21st-century skills. *Sustainability*, 12(24), 10366.
<https://doi.org/10.3390/su122410366>
- Husamah, H., Rahardjanto, A., Hadi, S., & Lestari, N. (2024). Lessons from global research on environmental literacy. *Biosfer: Jurnal Pendidikan Biologi*.
<https://doi.org/10.21009/biosferjpb.37491>
- Krajcik, J. S., & Blumenfeld, P. C. (2006). Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (pp. 317–334). Cambridge University Press.
- Levinson, R. (2018). Socio-scientific inquiry and citizenship education. *Studies in Science Education*, 54(1), 1–34. <https://doi.org/10.1080/03057267.2018.1435925>
- Magaña, A. J., Falk, M. L., Vieira, C., & Reese, M. J. (2025). Immersive virtual reality for STEM learning: A meta-analysis. *Computers & Education*, 210, 104999.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.104999>
- Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019). Adding immersive virtual reality to science simulations. *Learning and Instruction*, 60, 225–236.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>
- McKenney, S., & Reeves, T. C. (2019). *Conducting educational design research* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315105642>
- Muñoz-Saavedra, L., Miralles-Guasch, C., & López, E. (2020). Sustainability competencies: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120132.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120132>
- OECD. (2025). *Trends shaping education 2025*. OECD Publishing.
https://www.oecd.org/en/publications/2025/01/trends-shaping-education-2025_3069cbd2.html
- Owens, D. C., & Sadler, T. D. (2024). Socio-scientific issues as contexts for sustainability-oriented scientific literacy. *Science Education*.
- Özel, M. (2024). Research trends on socio-scientific issues in science education. *Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 1(1), 69–83.
<https://doi.org/10.12973/jmste.1.1.69>
- Parmin, P., Nuangchalerm, P., & El Islami, R. A. Z. (2023). Enhancing students' scientific literacy through ethnoscience-based learning. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 12(1). <https://doi.org/10.15294/jpii.v12i1>

- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications in higher education. *Education and Information Technologies*, 25, 1839–1886. <https://doi.org/10.1007/s10639-019-10063-7>
- Ramadanty, R., Handayani, S., & Putri, S. W. (2025). SSI-ESD climate change module for environmental awareness. *Jurnal Kependidikan*, 11(4), 1585–1595. <https://doi.org/10.33394/jk.v11i4.17615>
- Reeves, T. C. (2006). Design research from a technology perspective. In J. van den Akker et al. (Eds.), *Educational Design Research* (pp. 52–66). Routledge.
- Rieckmann, M. (2018). *Learning to transform the world: Key competencies in Education for Sustainable Development*. UNESCO Publishing.
- Rusmansyah, R., Leny, L., & Sofia, H. N. (2023). Improving scientific literacy through ethnoscience-based PjBL. *Journal of Innovation in Educational and Cultural Research*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.46843/jiecr.v4i1.382>
- Sadler, T. D. (2011). *Socio-scientific issues in the classroom: Teaching, learning and research*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1159-4>
- Saleh, A., Yuxin, C., Hmelo-Silver, C. E., Glazewski, K. D., Mott, B. W., & Lester, J. C. (2020). Coordinating scaffolds for collaborative inquiry learning. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(9), 1490–1518. <https://doi.org/10.1002/tea.21656>
- Solihin, A., Suryanti, S., Susiyawati, E., & Julianto. (2025). Integrating socio-scientific issues based on SDGs. *Jurnal Cakrawala Pendas*, 11(3), 763–774. <https://doi.org/10.31949/jcp.v11i3.13396>
- Sudarmin, S., Parmin, P., & Sumarni, W. (2019). Ethnoscience-based learning to improve environmental literacy. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 8(2), 215–222. <https://doi.org/10.15294/jpii.v8i2.19297>
- Sudarmin, S., Pujiastuti, R. S. E., Asyhar, R., Prasetya, A. T., Diliarosta, S., & Ariyatun, R. (2023). Ethno-STEM project-based learning. *Journal of Technology and Science Education*, 13(1), 393–409. <https://doi.org/10.3926/jotse.1792>
- Sudarmin, S., Sumarni, W., Zahro, L., & Pujiastuti, S. E. (2018). Integration of ethnoscience approach in science learning. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 7(1), 1–7. <https://doi.org/10.15294/jpii.v7i1.13668>
- Sudarmin, S., Zahro, L., Pujiastuti, S. E., Asyhar, R., Zaenuri, Z., & Rosita, A. (2017). Development of ethnoscience approach in science modules. *Journal of Physics: Conference Series*, 824(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/824/1/012024>
- Sudarmin, S., Zahro, L., Pujiastuti, S. E., Asyhar, R., Zaenuri, Z., & Rosita, A. (2019). PBL-based worksheets integrated with ethnoscience. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 8(4), 492–499. <https://doi.org/10.15294/jpii.v8i4.17546>
- Sumarni, W., Sudarmin, S., & Supartono. (2016). Reconstruction of indigenous science into scientific knowledge. *Journal of Turkish Science Education*, 13(4), 281–292.
- Tilman, D., & Clark, M. (2014). Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*, 515(7528), 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>
- Trott, C. D. (2023). Transformative sustainability learning. *Sustainability Science*, 18(6), 2351–2365.
- UNESCO. (2017). *Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives*. <https://unesdoc.unesco.org>

-
- UNESCO. (2020). *Education for Sustainable Development: A Roadmap*.
<https://doi.org/10.54675/YFRE1448>
- UNESCO. (2023). *ESD for 2030: Progress and Implementation Framework*.
- Verawati, N. N. S. P., & Purwoko, A. A. (2024). Interactive laboratory technologies in science education. *International Journal of Ethnoscience and Technology in Education*, 1(1), 76–96. <https://doi.org/10.33394/ijete.v1i1.12154>
- Wals, A. E. J. (2015). *Beyond unreasonable doubt: Education and learning for socio-ecological sustainability*. Wageningen University.
- Wang, F., & Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4), 5–23. <https://doi.org/10.1007/BF02504682>
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Sibanda, L. M., & Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene. *The Lancet*, 393(10170), 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Artificial intelligence applications in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>
- Zeidler, D. L., Sadler, T. D., Simmons, M. L., & Howes, E. V. (2005). Beyond STS: A framework for socio-scientific issues education. *Science Education*, 89(3), 357–377. <https://doi.org/10.1002/sce.20048>