Insight of Biology
Vol. 2 No. 2, June 2026, pp. 67-74
E-ISSN 3109-1164

Efektivitas Metode Eksperimen Berbasis Mikroskopi Digital terhadap Keterampilan Proses Sains dan Psikomotorik Siswa pada Materi Protista

Akbar Rafi'i [a,1,*], Nisa Aulia Hafizah [b,2]
[a] Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jember, Jawa Timur, Indonesia
[b] Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jember, Jember, Jawa Timur, Indonesia
[1] rafiakbar@gmail.com ;

ARTICLE INFO

Article history
Received April 14, 2026
Revised April 28, 2026
Accepted June 02, 2026
Published June 22, 2026

Keywords
digital microscopy
experimental method
science process skills
psychomotor skills
protista

License by CC-BY-SA
Copyright © 2026, The Author(s).

ABSTRACT

The study of Protista in senior high school biology requires direct observation of microscopic organisms. However, limited microscope operation skills and low levels of students' science process skills often hinder effective learning. This study aimed to evaluate the effectiveness of a digital microscopy-based experimental method in improving science process skills (SPS) and psychomotor skills in learning Protista, compare its effectiveness with conventional light microscopy, and analyze the statistical differences between the two instructional approaches. The research was conducted at a public senior high school in Ternate using a quasi-experimental pretest-posttest control group design. The participants consisted of 63 tenth-grade science students, with 32 students assigned to the experimental group and 31 students to the control group. Data were analyzed using the N-Gain index and an independent samples t-test. The experimental group achieved mean posttest scores of 74.28% for science process skills and 76.27% for psychomotor skills, with N-Gain values of 0.59 and 0.62, respectively, both categorized as moderate. These results were significantly higher than those of the control group, which obtained N-Gain values of 0.37 for science process skills and 0.39 for psychomotor skills. The independent samples t-test confirmed significant differences between the two groups for both variables ($p < 0.001$). These findings indicate that digital microscopy is more effective than conventional light microscopy in enhancing students' science process skills and psychomotor performance in learning Protista.

How to cite: Rafi'i, A., & Hafizah, N. A. (2025). Efektivitas Metode Eksperimen Berbasis Mikroskopi Digital terhadap Keterampilan Proses Sains dan Psikomotorik Siswa pada Materi Protista. *Insight of Biology, 2*(2), 67-74. doi: https://doi.org/10.70716/inbio.v2i2.652

PENDAHULUAN

Keterampilan proses sains (KPS) dan keterampilan psikomotorik merupakan dua kompetensi mendasar dalam pembelajaran biologi yang saling berkaitan erat. KPS mencakup kemampuan mengobservasi, mengklasifikasi, menginterpretasi data, memprediksi, dan mengomunikasikan temuan ilmiah, sedangkan keterampilan psikomotorik merujuk pada kemampuan praktis dalam menangani peralatan laboratorium secara tepat dan terampil (Nasar & Kaleka, 2019; Nurhayati et al., 2025). Dalam konteks pembelajaran biologi SMA, pengembangan kedua kompetensi ini secara bersamaan sangat penting agar siswa tidak hanya memahami konsep secara teoritis, tetapi juga mampu menerapkan prosedur ilmiah secara mandiri dan bertanggung jawab.

Materi Protista merupakan salah satu topik dalam kurikulum biologi kelas X yang secara inheren membutuhkan pengamatan mikroskopis untuk memahami morfologi, struktur sel, dan perilaku organisme uniseluler seperti Amoeba, Paramecium, Euglena, dan berbagai alga. Pengamatan langsung melalui mikroskop tidak hanya mendukung pemahaman konseptual, tetapi juga secara langsung melatih KPS pada dimensi observasi, klasifikasi, dan interpretasi (Maryam, 2022; Hartanti et al., 2018). Namun, pembelajaran berbasis mikroskop konvensional di sekolah sering menghadapi berbagai kendala, antara lain terbatasnya jumlah mikroskop yang berfungsi baik, sulitnya siswa menyetel fokus secara mandiri, serta ketidakmampuan berbagi hasil pengamatan secara simultan dalam satu kelas (Priyani & Nawawi, 2020).

Perkembangan teknologi digital telah menghasilkan berbagai inovasi instrumen mikroskopi yang dapat diintegrasikan ke dalam pembelajaran, mulai dari kamera yang dipasang pada mikroskop cahaya biasa, mikroskop smartphone portabel, hingga sistem mikroskopi digital berbasis jaringan yang memungkinkan seluruh siswa mengamati dan mendiskusikan preparat yang sama secara bersamaan. Wilson et al. (2016) dalam meta-analisis komprehensifnya yang mencakup 35 studi menemukan bahwa mikroskopi virtual dan digital menghasilkan kinerja belajar yang setara atau bahkan lebih baik dibandingkan mikroskop optik konvensional dalam berbagai konteks pendidikan sains. Sistem mikroskopi digital berbasis LAN bahkan menunjukkan peningkatan signifikan dalam interaksi kelas dan efisiensi waktu pengamatan (Xu et al., 2024; Hong-peng et al., 2012).

Dari perspektif pedagogis, integrasi mikroskopi digital mendukung prinsip pembelajaran aktif dan inquiri karena siswa dapat merekam, membandingkan, dan mendiskusikan gambar hasil pengamatan mereka secara kolaboratif (Su et al., 2011; Berg et al., 2016). Haun & Foley (2018) menyatakan bahwa alat elektronik dan media digital dalam pengajaran keterampilan mikroskopis meningkatkan keterlibatan kognitif siswa secara lebih mendalam dibandingkan demonstrasi pasif dengan mikroskop konvensional. Sementara itu, penelitian Raven et al. (2020) mengkonfirmasi bahwa teknik mikroskopi baru yang berbasis digital secara efektif meningkatkan kompetensi laboratorium siswa SMP dan SMA di berbagai konteks.

Di Indonesia, beberapa penelitian telah mengeksplorasi penggunaan teknologi mikroskopi alternatif dalam pembelajaran biologi. Samsuar et al. (2023) melaporkan korelasi positif antara keterampilan psikomotorik dan hasil belajar kognitif siswa yang menggunakan mikroskop smartphone berbasis STEM pada materi Animalia. Priyani & Nawawi (2020) menemukan bahwa pembelajaran IPA berbantuan mikroskop digital mampu meningkatkan KPS siswa di sekolah perbatasan. Firdaus et al. (2022) mengembangkan mikroskop online interaktif dan melaporkan peningkatan signifikan dalam keterlibatan siswa selama praktikum daring. Maryam (2022) menunjukkan bahwa penggunaan media microcam meningkatkan keterampilan siswa pada materi jaringan tumbuhan. Meskipun demikian, kajian yang secara spesifik membandingkan efektivitas mikroskopi digital dengan mikroskop konvensional pada materi Protista di jenjang SMA dengan mengukur KPS dan keterampilan psikomotorik secara bersamaan masih sangat terbatas.

Celah penelitian ini menjadi relevan untuk diisi mengingat materi Protista memiliki karakteristik unik dibandingkan materi biologi lainnya: organisme yang diamati bersifat hidup dan bergerak, morfologinya sangat beragam antar kelompok taksonomi, dan identifikasi jenisnya membutuhkan keterampilan observasi yang terlatih. Sistem mikroskopi digital memungkinkan rekaman video pergerakan organisme, perbandingan gambar antar kelompok, dan anotasi digital yang tidak dapat dilakukan dengan mikroskop cahaya konvensional (Kim et al., 2016; Zhang et al., 2022). Keunggulan ini secara teoritis seharusnya memberikan dampak lebih besar pada pengembangan KPS dan keterampilan psikomotorik siswa.

Penelitian ini dilaksanakan di SMA Negeri 2 Ternate, Kecamatan Ternate Tengah, Kota Ternate, Maluku Utara. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada konteks geografis kepulauan yang kaya keanekaragaman hayati laut termasuk protista laut, serta karakteristik sekolah sebagai salah satu SMA unggulan di Kota Ternate yang telah memiliki fasilitas laboratorium biologi memadai dan telah mengimplementasikan Kurikulum Merdeka. Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas metode eksperimen berbasis mikroskopi digital terhadap KPS siswa pada materi Protista, menganalisis pengaruhnya terhadap keterampilan psikomotorik, serta membandingkan kedua variabel tersebut antara kelas eksperimen dan kelas kontrol menggunakan pengukuran N-Gain dan uji statistik (Aisy et al., 2024; Arrozi et al., 2025).

METODE PENELITIAN

Desain dan Lokasi Penelitian

Penelitian menggunakan desain quasi-experimental dengan pola pretest-posttest control group design. Penelitian dilaksanakan di SMA Negeri 2 Ternate, Kecamatan Ternate Tengah, Kota Ternate, Maluku Utara, pada semester genap tahun ajaran 2023/2024, tepatnya pada bulan Maret hingga Mei 2024. Lokasi ini dipilih karena SMA Negeri 2 Ternate merupakan sekolah rujukan di Kota Ternate yang memiliki laboratorium biologi dengan ketersediaan perangkat komputer dan proyektor yang memungkinkan implementasi sistem mikroskopi digital berbasis kamera. Selain itu, konteks ekosistem pesisir di sekitar Kota

Ternate menyediakan sampel air laut dan air tawar yang kaya akan protista alami, sehingga relevan sebagai bahan pengamatan autentik selama kegiatan praktikum.

Subjek Penelitian

Subjek penelitian adalah 63 siswa kelas X IPA SMA Negeri 2 Ternate. Kelas X IPA 1 (n=32) ditetapkan sebagai kelas eksperimen yang melaksanakan metode eksperimen dengan sistem mikroskopi digital berupa kamera adaptasi yang dipasang pada lensa okuler mikroskop dan dihubungkan ke layar monitor kelas. Kelas X IPA 2 (n=31) ditetapkan sebagai kelas kontrol yang melaksanakan metode eksperimen dengan mikroskop cahaya konvensional tanpa koneksi digital. Homogenitas kemampuan awal kedua kelas dikonfirmasi melalui uji kesetaraan nilai ulangan tengah semester biologi sebelumnya ($p > 0,05$). Rincian sampel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain dan Karakteristik Sampel Penelitian

Kelas	Perlakuan	Jumlah Siswa	Pretest KPS (%)	Pretest PSM (%)	Keterangan
X IPA 1	Eksperimen – metode eksperimen + mikroskopi digital	32	37,7	38,3	Kelas eksperimen
X IPA 2	Kontrol – metode eksperimen + mikroskop cahaya konvensional	31	37,2	37,8	Kelas kontrol
Total	–	**63**	**37,4**	**38,0**	–

Sumber: Data primer penelitian (2024)

Prosedur Pelaksanaan

Kelas eksperimen melaksanakan lima pertemuan praktikum (2 x 45 menit per pertemuan) yang mencakup pengamatan: (1) protista mirip hewan (Rhizopoda, Flagellata, Ciliata); (2) protista mirip tumbuhan (Chlorophyta, Chrysophyta, Pyrrophyta); dan (3) protista mirip jamur (Myxomycota). Setiap kelompok siswa (4–5 orang) menggunakan satu unit mikroskop yang dilengkapi kamera digital, dan gambar hasil pengamatan ditampilkan secara bersamaan pada monitor kelas sehingga memudahkan diskusi dan perbandingan antar kelompok (Su et al., 2011; Maughan & Mackenzie, 2004). Siswa juga melakukan anotasi digital pada gambar yang dihasilkan. Kelas kontrol melaksanakan prosedur praktikum yang identik, namun tanpa fasilitas kamera dan monitor; hasil pengamatan hanya digambar manual pada lembar kerja. Weeks et al. (2013) menekankan pentingnya laboratorium pencitraan digital dalam membuat kegiatan mikroskopi lebih memotivasi dan mudah diingat oleh siswa, dan prosedur kelas eksperimen dalam penelitian ini mengacu pada prinsip tersebut.

Instrumen Penelitian

KPS diukur menggunakan lembar observasi terstruktur yang mencakup lima dimensi: observasi, klasifikasi, interpretasi data, prediksi, dan komunikasi ilmiah, dengan total 20 indikator perilaku yang diobservasi selama praktikum. Keterampilan psikomotorik diukur menggunakan rubrik kinerja yang mencakup tiga dimensi: persiapan alat dan bahan, penggunaan mikroskop secara tepat, serta kualitas pengamatan dan pembuatan gambar, dengan total 15 indikator (Hartanti et al., 2018; Nasar & Kaleka, 2019). Kedua instrumen divalidasi oleh dua ahli pendidikan biologi dengan nilai Content Validity Index (CVI) > 0,80. Reliabilitas antar pengamat (inter-rater reliability) diukur menggunakan koefisien Cohen Kappa dengan nilai $\kappa = 0,84$ untuk rubrik KPS dan $\kappa = 0,87$ untuk rubrik psikomotorik, keduanya masuk kategori hampir sempurna.

Analisis Data

Efektivitas perlakuan dihitung menggunakan indeks N-Gain (Hake) dengan kategori tinggi (≥ 0,70), sedang (0,30–0,69), dan rendah (< 0,30). Uji prasyarat statistik parametrik meliputi uji normalitas Shapiro-Wilk dan uji homogenitas Levene. Perbedaan antar kelompok diuji menggunakan independent sample t-test pada taraf signifikansi 5% dengan perangkat lunak SPSS versi 26. Seluruh analisis dilakukan terhadap data posttest dan nilai N-Gain masing-masing variabel (Hernawati et al., 2022; Nurhayati et al., 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keterampilan Proses Sains

Hasil pengukuran KPS menunjukkan peningkatan yang konsisten pada kelas eksperimen di seluruh dimensi. Rerata posttest KPS kelas eksperimen mencapai 74,28%, meningkat dari pretest 37,7% dengan N-Gain 0,59 (kategori sedang). Kelas kontrol memperoleh rerata posttest 60,38%, meningkat dari 37,2% dengan N-Gain 0,37 (kategori sedang). Pada level dimensi, observasi mencatat N-Gain tertinggi di kelas eksperimen (0,62), sedangkan prediksi mencatat N-Gain terendah (0,52). Pola ini mengindikasikan bahwa tampilan visual langsung dari sistem mikroskopi digital paling efektif dalam melatih kemampuan observasi yang terperinci, sejalan dengan temuan Berg et al. (2016) yang mengkonfirmasi keunggulan mikroskopi digital dalam mendukung observasi berkualitas tinggi melalui eye tracking.

Peningkatan KPS pada kelas eksperimen berkaitan erat dengan kemampuan sistem mikroskopi digital untuk menyajikan gambar yang lebih tajam, dapat diperbesar, dan dapat didiskusikan secara kolektif. Ketika seluruh kelompok dapat melihat gambar yang sama pada monitor kelas, diskusi tentang ciri morfologi protista menjadi lebih terarah dan produktif, sehingga dimensi interpretasi dan komunikasi ilmiah juga berkembang lebih baik (Hong-peng et al., 2012; Su et al., 2011). Haun & Foley (2018) menegaskan bahwa integrasi media elektronik dalam pengajaran keterampilan mikroskopis secara khusus meningkatkan kemampuan siswa dalam menginterpretasi dan mengomunikasikan hasil pengamatan. Hernawati et al. (2022) juga melaporkan bahwa modul digital berkontribusi signifikan pada hasil belajar siswa pada sub konsep protista, yang mendukung temuan penelitian ini.

Keterampilan Psikomotorik

Keterampilan psikomotorik kelas eksperimen menghasilkan rerata posttest 76,27% dengan N-Gain 0,62 (kategori sedang), lebih tinggi dibandingkan kelas kontrol yang memperoleh rerata posttest 61,73% dan N-Gain 0,39 (kategori sedang). Dimensi persiapan alat mencatat N-Gain tertinggi di kelas eksperimen (0,65), sedangkan dimensi pengamatan dan gambar mencatat N-Gain terendah (0,58). Temuan menarik adalah bahwa kelas eksperimen justru mengungguli kelas kontrol pada dimensi penggunaan mikroskop secara nyata (N-Gain 0,63 vs 0,40), padahal secara intuitif siswa yang menggunakan mikroskop konvensional dengan lebih banyak manipulasi manual seharusnya lebih terlatih pada dimensi ini.

Keunggulan kelas eksperimen pada dimensi penggunaan mikroskop dapat dijelaskan melalui mekanisme umpan balik visual langsung yang disediakan oleh sistem digital. Ketika gambar ditampilkan pada monitor, guru dan siswa lain dapat langsung melihat apakah fokus sudah tepat, apakah preparat sudah berada di tengah bidang pandang, dan apakah intensitas cahaya sudah optimal, sehingga koreksi dapat dilakukan segera dan lebih spesifik (Kim et al., 2016; Raven et al., 2020). Mekanisme umpan balik langsung ini tidak tersedia pada penggunaan mikroskop konvensional di mana hanya satu orang yang dapat melihat hasil observasi pada satu waktu. Samsuar et al. (2023) melaporkan korelasi positif antara keterampilan psikomotorik penggunaan mikroskop smartphone dengan hasil belajar kognitif, dan temuan penelitian ini memperkuat hubungan tersebut dengan menunjukkan N-Gain yang lebih tinggi secara keseluruhan.

Chou & Wang (2021) menemukan bahwa mikroskop mobile mendukung inkuiri ilmiah anak-anak secara lebih mendalam dibandingkan pengamatan pasif, dan prinsip yang sama berlaku pada konteks SMA dalam penelitian ini. Vydra & Kováčik (2024) melaporkan bahwa analisis citra berbasis digital meningkatkan pengetahuan dan keterampilan siswa dalam biologi alga dan fungi secara signifikan, topik yang memiliki kesamaan prosedural dengan pengamatan protista. LudusScope yang dikembangkan oleh Kim et al. (2016) sebagai mikroskop smartphone interaktif juga menunjukkan efektivitas serupa dalam meningkatkan keterampilan pengamatan biologis pada setting pendidikan.

Perbandingan Antar Dimensi

Diagram 1 memvisualisasikan perbandingan rerata skor pretest dan posttest per dimensi KPS dan psikomotorik pada kelas eksperimen secara ringkas untuk memudahkan interpretasi pola peningkatan antar dimensi.

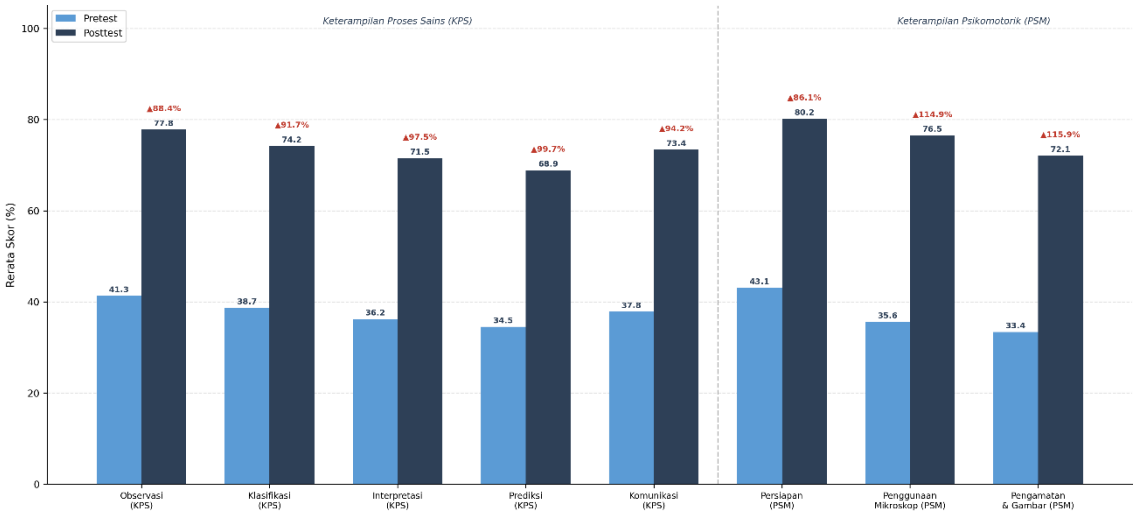

Diagram 1. Perbandingan Rerata Skor Pretest dan Posttest per Dimensi KPS dan Keterampilan Psikomotorik Kelas Eksperimen

Tabel 2. Rerata Skor Pretest, Posttest, dan N-Gain per Dimensi KPS dan Psikomotorik

Dimensi	Pre Eks (%)	Post Eks (%)	Pre Kont (%)	Post Kont (%)	N-Gain Eks	N-Gain Kont
Observasi (KPS)	41,3	77,8	40,8	63,4	0,62	0,38
Klasifikasi (KPS)	38,7	74,2	38,2	60,7	0,58	0,36
Interpretasi (KPS)	36,2	71,5	35,9	58,3	0,56	0,35
Prediksi (KPS)	34,5	68,9	34,1	56,1	0,52	0,33
Komunikasi (KPS)	37,8	73,4	37,4	59,9	0,57	0,35
Persiapan Alat (PSM)	43,1	80,2	42,7	65,8	0,65	0,40
Penggunaan Mikroskop (PSM)	35,6	76,5	35,2	61,0	0,63	0,40
Pengamatan & Gambar (PSM)	33,4	72,1	33,0	58,4	0,58	0,37
Rerata Keseluruhan	**37,6**	**74,3**	**37,2**	**60,4**	**0,59**	**0,37**

Sumber: Data primer penelitian (2024). KPS = Keterampilan Proses Sains; PSM = Psikomotorik; Eks = Eksperimen; Kont = Kontrol.

Uji Prasyarat dan Uji Hipotesis

Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk menunjukkan bahwa data posttest KPS dan psikomotorik dari kedua kelas berdistribusi normal ($p > 0,05$ untuk seluruh kelompok). Uji homogenitas Levene mengkonfirmasi kesetaraan varians antara kedua kelas untuk kedua variabel ($p > 0,05$). Dengan terpenuhinya kedua prasyarat tersebut, uji independent sample t-test dilaksanakan sebagaimana disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Uji Normalitas (Shapiro-Wilk) dan Homogenitas (Levene) Data Posttest

Variabel	Kelas	Shapiro-Wilk W	Sig. Normalitas	Levene F	Sig. Homogenitas	Ket.
KPS (Posttest)	Eksperimen	0,967	0,408			Normal
	Kontrol	0,961	0,318	1,843	0,179	Normal, Homogen
PSM (Posttest)	Eksperimen	0,964	0,371			Normal
	Kontrol	0,959	0,294	2,017	0,160	Normal, Homogen

Sumber: Data primer penelitian (2024). Sig. > 0,05 menunjukkan distribusi normal dan varians homogen.

Tabel 4. Hasil Uji Independent Sample t-Test KPS dan Keterampilan Psikomotorik

Variabel	Rerata Eks (%)	Rerata Kont (%)	Selisih	t hitung	df	Sig. (2-tailed)
KPS (Posttest)	74,28	60,38	13,90	10,241	61	0,000*
PSM (Posttest)	76,27	61,73	14,54	11,083	61	0,000*
N-Gain KPS	0,59	0,37	0,22	12,576	61	0,000*
N-Gain PSM	0,62	0,39	0,23	13,118	61	0,000*

*Sumber: Data primer penelitian (2024). *Berpengaruh nyata pada taraf p < 0,05; df = derajat kebebasan.*

Uji independent sample t-test menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan antara kelas eksperimen dan kelas kontrol pada KPS (t=10,241; df=61; p=0,000) maupun keterampilan psikomotorik (t=11,083; df=61; p=0,000). Perbedaan rerata posttest mencapai 13,90% untuk KPS dan 14,54% untuk psikomotorik. Perbedaan N-Gain antara kedua kelas (KPS: 0,59 vs 0,37; PSM: 0,62 vs 0,39) memperkuat kesimpulan bahwa efek positif bukan semata karena perbedaan kemampuan awal, melainkan merupakan dampak nyata dari perlakuan mikroskopi digital. Wilson et al. (2016) dalam meta-analisis mereka menyimpulkan bahwa kinerja siswa pada virtual dan digital microscopy setara atau lebih baik dibandingkan mikroskop optik, dan temuan penelitian ini konsisten dengan kesimpulan tersebut, bahkan menunjukkan keunggulan yang lebih nyata pada konteks keterampilan psikomotorik. Priyani & Nawawi (2020) juga melaporkan temuan serupa pada konteks pembelajaran IPA di sekolah perbatasan menggunakan mikroskop digital, mengkonfirmasi generalisabilitas temuan ini di berbagai konteks geografis di Indonesia.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan secara empiris bahwa metode eksperimen berbasis mikroskopi digital memberikan pengaruh positif dan signifikan terhadap keterampilan proses sains dan keterampilan psikomotorik siswa kelas X SMA Negeri 2 Ternate pada materi Protista. Kelas eksperimen memperoleh rerata posttest KPS 74,28% dan psikomotorik 76,27%, dengan N-Gain masing-masing 0,59 dan 0,62 (kategori sedang), secara nyata lebih tinggi dibandingkan kelas kontrol yang menggunakan mikroskop cahaya konvensional (N-Gain KPS 0,37 dan PSM 0,39). Uji independent sample t-test mengkonfirmasi perbedaan yang sangat signifikan pada taraf p < 0,001 untuk kedua variabel.

Dimensi observasi dan persiapan alat mencatat N-Gain tertinggi di kelas eksperimen, mengindikasikan bahwa sistem umpan balik visual langsung dari mikroskopi digital paling efektif dalam mengembangkan kemampuan observasi terperinci dan ketertiban prosedur kerja laboratorium. Keunggulan mikroskopi digital terletak pada kemampuannya menampilkan hasil pengamatan secara kolektif pada monitor kelas, memfasilitasi diskusi berbasis bukti visual, dan menyediakan umpan balik langsung selama proses penggunaan alat. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji integrasi mikroskopi digital dengan pendekatan STEM atau SSI pada materi Protista, mengembangkan modul digital berbasis hasil pengamatan autentik dari ekosistem lokal, serta mengevaluasi efektivitas sistem mikroskopi berbasis 5G atau LAN pada konteks sekolah dengan kelas yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Sekolah dan guru biologi SMA Negeri 2 Ternate atas izin dan dukungan selama pelaksanaan penelitian. Terima kasih juga disampaikan kepada para validator instrumen penelitian dan seluruh siswa kelas X IPA yang telah berpartisipasi aktif sebagai subjek penelitian.

REFERENSI

Aisy, M. R., Trisnowati, E., & Siswanto. (2024). The effect of the problem-based learning (PBL) model in the context of socio-scientific issues (SSI) on critical thinking ability on digestive system material. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA, 10*(2). https://doi.org/10.21831/jipi.v10i2.75231

Arrozi, F. R., Fauziah, N. N., & Wicaksono, A. (2025). Penerapan pendekatan teaching at the right level (TaRL) dalam model pembelajaran saintifik pada materi sistem pencernaan untuk meningkatkan kemampuan berpikir kritis peserta didik. *VEKTOR, 6*(1). https://doi.org/10.35719/vektor.v6i1.190

Berg, J., Jäkel, L., & Penzes, A. (2016). Digital and conventional microscopy: Learning effects detected through eye tracking and the use of interactive whiteboards. *Universal Journal of Educational Research, 4*(6). https://doi.org/10.13189/UJER.2016.040609

Chou, P.-N., & Wang, P.-J. (2021). Looking deeper: Using the mobile microscope to support young children's scientific inquiries. *Sustainability, 13*(7), 3663. https://doi.org/10.3390/SU13073663

Firdaus, Z., Izza, J. N., Aruna, A., et al. (2022). Pengembangan mikroskop online interaktif pada materi biologi sel guna revitalisasi pembelajaran praktikum daring. *Jurnal Inovasi Pembelajaran, 8*(1). https://doi.org/10.22219/jinop.v8i1.18997

Hartanti, I., Raharjo, & Purnomo, T. (2018). Pengembangan perangkat pembelajaran penemuan terbimbing berbantuan mikroskop sederhana untuk melatihkan keterampilan proses sains dan pemahaman konsep materi sistem organisasi kehidupan pada siswa SMP. *Jurnal Penelitian Pendidikan Sains, 7*(1), 1397–1408. https://doi.org/10.26740/JPPS.V7N1.P1397-1408

Haun, D., & Foley, A. (2018). Electronic tools and media for teaching microscopic skills. *Clinical Laboratory Science, 31*(4). https://doi.org/10.29074/ascls.2018000851

Hernawati, D., Yunita, N., & Wahjuningsih, S. (2022). Pengaruh modul digital terhadap hasil belajar siswa pada sub konsep protista mirip hewan. *Jurnal Life Science: Jurnal Pendidikan dan Ilmu Pengetahuan Alam, 4*(1). https://doi.org/10.31980/lsciences.v4i1.1712

Hong-peng, H., Wen-hui, X., Qing-mei, H., et al. (2012). Practice of digital microscope mutual system in experiment teaching of cell biology. *China Modern Educational Equipment*. https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-0834.2012.04.018

Kim, H., Gerber, L. C., Chiu, D., et al. (2016). LudusScope: Accessible interactive smartphone microscopy for life-science education. *PLOS ONE, 11*(10), e0162602. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162602

Maryam, S. (2022). Peningkatan keterampilan siswa pada materi struktur jaringan tumbuhan melalui penggunaan media microcam. *Teacher: Jurnal Inovasi Karya Ilmiah Guru, 2*(2). https://doi.org/10.51878/teacher.v2i2.1334

Nasar, A., & Kaleka, M. B. U. (2019). Effectiveness of experimental laboratory methods on understanding the concept of light, science process skills, and scientific attitudes of students. *Jurnal Pendidikan Fisika, 7*(3). https://doi.org/10.26618/JPF.V7I3.2333

Nurhayati, H. O., Sartika, S. B., & Salim, A. (2025). Experimental method improves psychomotor skills in natural science learning. *Indonesian Journal of Education Methods Development, 20*(4). https://doi.org/10.21070/ijemd.v20i4.900

Priyani, N. E., & Nawawi. (2020). Pembelajaran IPA berbasis ethno-STEM berbantu mikroskop digital untuk meningkatkan keterampilan proses sains di sekolah perbatasan. *Wasis: Jurnal Ilmiah Pendidikan, 1*(2). https://doi.org/10.24176/WASIS.V1I2.5435

Raven, S., Cevik, E., & Model, M. A. (2020). Assessing the effectiveness of a novel microscopy technique in middle and high school science classrooms. *The American Biology Teacher, 82*(7), 463–468. https://doi.org/10.1525/ABT.2020.82.7.463

Samsuar, Artika, W., Hamama, S. F., et al. (2023). Hubungan keterampilan psikomotorik terhadap hasil belajar kognitif peserta didik dengan penerapan mikroskop smartphone berbasis pendekatan STEM sebagai alat praktikum pada materi animalia. *Jurnal Dedikasi Pendidikan, 7*(1). https://doi.org/10.30601/dedikasi.v7i1.3490

Su, M.-H., Liao, Y.-H., Tsai, C.-Y., et al. (2011). Digital microscope recording system to enhance students' understanding of biological observation. In *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 177, pp. 300–309). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22763-9_29

Vydra, M., & Kováčik, J. (2024). The use of image analysis in improving knowledge and skills on the example of teaching the biology of algae and fungi. *Education and Information Technologies*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s10639-024-13004-3

Weeks, A., Bachman, B., Josway, S., et al. (2013). Making microscopy motivating, memorable, and manageable for undergraduate students with digital imaging laboratories. *The American Biology Teacher, 75*(8), 588–595. https://doi.org/10.1525/ABT.2013.75.8.10

Wilson, A. B., Taylor, M. A., Klein, B. A., et al. (2016). Meta-analysis and review of learner performance and preference: Virtual versus optical microscopy. *Medical Education, 50*(4), 428–440. https://doi.org/10.1111/medu.12944

Xu, J., Sha, J., Jia, S., et al. (2024). Effectiveness of a 5G LAN-based digital microscopy interactive system: A quasi-experimental design. *JMIR Medical Ed*ucation. Advance online publication. https://doi.org/10.2196/70256

Zhang, H., Zhang, M., Pan, Z., et al. (2022). GiantScope: A simulation microscopy for middle school biological experiment education. *Computer Animation and Virtual Worlds, 33*(5). https://doi.org/10.1002/cav.2083