

**Analisis Biaya-Manfaat Implementasi Otomatisasi dalam Pengelolaan Laboratorium Bioteknologi Perikanan dari Perspektif Ekonomi dan Keberlanjutan**

***Cost-Benefit Analysis of Automation Implementation in Fisheries Biotechnology Laboratory Management from An Economic and Sustainability Perspective***

**Triayu Rahmadiyah<sup>1</sup>, Siska Almaniar<sup>2</sup>, Septi Hermalingga<sup>2</sup>, Dwindi Pangentasari<sup>3</sup>, Yogie Zulni Pratama<sup>3</sup>, Tiara Santeri<sup>4</sup>, Anis Nugrahawati<sup>5</sup>, Akmal Izwar<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Akademi Komunitas Negeri Rejang Lebong, Indonesia

<sup>2</sup>Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

<sup>3</sup>Universitas Jambi, Indonesia

<sup>4</sup>Universitas PGRI Palembang, Indonesia

<sup>5</sup>Universitas Malikussaleh

<sup>6</sup>Universitas Almuslim

\*Email Co-Authors: [triyu.rahmadiyah@akrel.ac.id](mailto:triyu.rahmadiyah@akrel.ac.id)

<b>Info Artikel</b>	
<b>DOI: 10.33369/pelastek.v5i1.41665</b>	
<p><b>Kata Kunci:</b> Otomatisasi laboratorium, Bioteknologi perikanan, Analisis biaya-manfaat, Keberlanjutan, Efisiensi energi.</p>	<p><b>Abstrak</b> Penelitian ini mengkaji implementasi otomatisasi dalam pengelolaan laboratorium bioteknologi perikanan dari perspektif ekonomi dan keberlanjutan melalui analisis biaya-manfaat. Melalui tinjauan literatur komprehensif, studi ini mengeksplorasi dampak ekonomi, efisiensi operasional, dan implikasi keberlanjutan dari sistem otomatisasi laboratorium. Hasil menunjukkan bahwa meskipun investasi awal signifikan, otomatisasi laboratorium menawarkan manfaat jangka panjang dalam hal peningkatan produktivitas, akurasi, dan efisiensi energi. Namun, tantangan seperti biaya implementasi tinggi dan kebutuhan adaptasi tenaga kerja perlu diatasi. Penelitian ini menyoroti pentingnya pendekatan holistik dalam mengadopsi teknologi otomatisasi, mempertimbangkan tidak hanya aspek ekonomi tetapi juga dampak sosial dan lingkungan untuk mencapai keberlanjutan jangka panjang dalam pengelolaan laboratorium bioteknologi perikanan.</p>
<p><b>Keywords:</b> <i>Laboratory automation, Fisheries biotechnology, Cost-benefit analysis, Sustainability, Energy efficiency</i></p>	<p><b>Abstract</b> <i>This research examines the implementation of automation in fisheries biotechnology laboratory management from an economic and sustainability perspective through a cost-benefit analysis. Through a comprehensive literature review, this study explores the economic impact, operational efficiency, and sustainability implications of laboratory automation systems. Results show that although the initial investment is significant, laboratory automation offers long-term benefits in terms of improved productivity, accuracy, and energy efficiency. However, challenges such as high implementation costs and the need for workforce adaptation need to be</i></p>

	<i>addressed. This research highlights the importance of a holistic approach in adopting automation technologies, considering not only economic aspects but also social and environmental impacts to achieve long-term sustainability in fisheries biotechnology laboratory management.</i>
<b>Riwayat Artikel:</b> Diterima: 06 Mei 2025 Revisi: 17 Juni 2025 Diterima: 29 Juni 2025	Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/">CC-BY-SA</a> . 

## PENDAHULUAN

Perkembangan pesat dalam bidang bioteknologi perikanan telah mendorong kebutuhan akan pengelolaan laboratorium yang lebih efisien, akurat, dan berkelanjutan. Implementasi sistem otomatisasi dalam laboratorium bioteknologi perikanan muncul sebagai solusi potensial untuk memenuhi tuntutan ini. Namun, adopsi teknologi otomatisasi juga membawa tantangan tersendiri, terutama dari segi investasi awal yang signifikan dan kebutuhan adaptasi tenaga kerja (Acemoglu dan Restrepo, 2019). Oleh karena itu, analisis biaya-manfaat yang komprehensif menjadi krusial untuk mengevaluasi kelayakan dan keberlanjutan implementasi otomatisasi dalam konteks laboratorium bioteknologi perikanan. Otomatisasi laboratorium melibatkan penggunaan teknologi canggih seperti robotika, kecerdasan buatan (AI), dan sistem manajemen data untuk melaksanakan tugas-tugas laboratorium dengan intervensi manusia yang minimal. Teknologi ini menawarkan potensi untuk meningkatkan efisiensi, akurasi, dan produktivitas secara signifikan. Namun, implementasinya juga menimbulkan pertanyaan penting terkait dampak ekonomi, sosial, dan lingkungan (Ibrahim Nouzil et al., 2017). Dari perspektif ekonomi, otomatisasi laboratorium menjanjikan peningkatan produktivitas dan pengurangan biaya operasional jangka panjang. Studi yang dilakukan oleh Harper dan Skarkas (2025) menunjukkan bahwa laboratorium yang terotomatisasi dapat meningkatkan throughput hingga 3,7 kali lipat dibandingkan dengan laboratorium konvensional. Namun, investasi awal yang tinggi untuk peralatan dan infrastruktur otomatisasi sering kali menjadi hambatan utama bagi banyak institusi.

Otomatisasi laboratorium memiliki potensi untuk mengurangi jejak karbon melalui optimalisasi penggunaan energi dan sumber daya. Vanclay dan Ryan (2024) melaporkan bahwa sistem otomatisasi dapat mengurangi penggunaan plastik sekali pakai hingga 30% dan mengoptimalkan penggunaan gas argon, yang berkontribusi pada pengurangan limbah dan konservasi sumber daya. Namun, peningkatan konsumsi energi akibat penggunaan peralatan berteknologi tinggi juga perlu dipertimbangkan dalam analisis keberlanjutan. Aspek sosial dari implementasi otomatisasi juga tidak kalah pentingnya. Pergeseran menuju otomatisasi dapat mengakibatkan perubahan dalam dinamika tenaga kerja, membutuhkan keterampilan baru dan peran-peran seperti teknisi robotika dan spesialis AI (Bernardi et al., 2024). Memastikan bahwa tenaga kerja dapat beradaptasi dengan perubahan ini menjadi krusial untuk menjaga keberlanjutan sosial dalam laboratorium yang terotomatisasi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis biaya-manfaat yang komprehensif terhadap implementasi otomatisasi dalam pengelolaan laboratorium bioteknologi perikanan, dengan mempertimbangkan aspek ekonomi dan keberlanjutan. Melalui tinjauan literatur yang ekstensif, studi ini akan mengeksplorasi dampak ekonomi, efisiensi operasional, implikasi lingkungan, dan tantangan sosial dari sistem otomatisasi laboratorium. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan berharga bagi para pembuat kebijakan, manajer laboratorium, dan peneliti dalam mengambil keputusan terkait adopsi teknologi otomatisasi di laboratorium bioteknologi perikanan.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur sistematis untuk menganalisis biaya-manfaat implementasi otomatisasi dalam pengelolaan laboratorium bioteknologi perikanan. Sumber data utama berasal dari artikel ilmiah yang terindeks di Scopus dan Google Scholar, diterbitkan antara tahun 2019 hingga 2025. Pencarian literatur dilakukan menggunakan kata kunci seperti "laboratory automation", "cost-benefit analysis", "biotechnology", "fisheries", dan "sustainability". Artikel yang relevan diseleksi berdasarkan kriteria inklusi yang mencakup fokus pada otomatisasi laboratorium, analisis ekonomi, dan aspek keberlanjutan. Data dari artikel terpilih kemudian diekstraksi, disintesis, dan dianalisis untuk mengidentifikasi tema-tema utama terkait biaya, manfaat, dan implikasi keberlanjutan dari implementasi otomatisasi laboratorium dalam konteks bioteknologi perikanan.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### *Analisis Ekonomi Implementasi Otomatisasi Laboratorium*

Implementasi otomatisasi dalam laboratorium bioteknologi perikanan memiliki implikasi ekonomi yang signifikan, baik dari segi biaya maupun manfaat. Investasi awal untuk sistem otomatisasi laboratorium seringkali substansial, mencakup biaya peralatan, instalasi, dan pelatihan staf. Menurut studi yang dilakukan oleh Harper dan Skarkas (2025), biaya implementasi sistem otomatisasi laboratorium dapat berkisar antara \$500.000 hingga \$5 juta, tergantung pada skala dan kompleksitas sistem yang diimplementasikan. Meskipun investasi awal ini signifikan, analisis jangka panjang menunjukkan potensi penghematan biaya yang besar. Manfaat ekonomi dari otomatisasi laboratorium terutama berasal dari peningkatan efisiensi dan produktivitas. Sebuah studi kasus yang dilakukan di Spedali Civili di Brescia mendemonstrasikan pengurangan total biaya sebesar 12,55% setelah implementasi otomatisasi, terutama karena penurunan biaya staf meskipun terjadi sedikit peningkatan biaya peralatan (Acemoglu dan Restrepo, 2019). Lebih lanjut, otomatisasi memungkinkan laboratorium untuk meningkatkan jumlah tes yang dilakukan per pekerja, dengan peningkatan produktivitas antara 1,4 hingga 3,7 kali lipat di bagian kimia klinik dan serologi (Ibrahim Nouzil et al., 2017).

### *Efisiensi Operasional dan Peningkatan Kualitas*

Otomatisasi laboratorium tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga berkontribusi pada peningkatan kualitas hasil penelitian. Sistem otomatisasi mengurangi kemungkinan kesalahan manusia yang umum terjadi dalam proses manual, sehingga meningkatkan akurasi dan konsistensi hasil. Vanclay dan Ryan (2024) melaporkan bahwa implementasi sistem otomatisasi di laboratorium bioteknologi dapat mengurangi tingkat kesalahan hingga 80% dibandingkan dengan metode manual. Selain itu, otomatisasi memungkinkan operasi laboratorium 24/7, menghilangkan waktu henti yang terkait dengan pergantian shift dan meningkatkan throughput laboratorium secara keseluruhan. Kemampuan ini sangat berharga dalam penelitian bioteknologi perikanan, di mana beberapa eksperimen memerlukan pemantauan dan pengukuran berkelanjutan. Bernardi et al. (2024) mencatat bahwa laboratorium yang terotomatisasi dapat meningkatkan kapasitas pemrosesan sampel hingga 300% tanpa penambahan staf yang signifikan.

### *Implikasi Lingkungan dan Keberlanjutan*

Dari perspektif keberlanjutan, otomatisasi laboratorium memiliki potensi untuk mengurangi dampak lingkungan melalui pengurangan limbah dan optimalisasi penggunaan sumber daya.

Sistem otomatisasi seperti Agilent Technologies' Advanced Dilution System 2 (ADS 2) telah terbukti mengurangi penggunaan plastik sekali pakai hingga 30% dan mengoptimalkan penggunaan gas argon, yang merupakan sumber daya intensif (Vanclay dan Ryan, 2024). Pengurangan limbah ini tidak hanya menurunkan biaya pengelolaan limbah tetapi juga berkontribusi pada upaya keberlanjutan global. Namun, perlu diperhatikan bahwa laboratorium otomatis umumnya mengkonsumsi lebih banyak energi dibandingkan laboratorium tradisional. Harper dan Skarkas (2025) melaporkan bahwa laboratorium otomatis dapat mengkonsumsi hingga sepuluh kali lipat energi dibandingkan laboratorium basah tradisional. Oleh karena itu, strategi untuk meningkatkan efisiensi energi menjadi krusial. Implementasi sistem HVAC yang efisien, penggunaan energi terbarukan, dan optimalisasi penggunaan peralatan dapat membantu memitigasi peningkatan konsumsi energi ini.

#### *Tantangan Implementasi dan Adaptasi Tenaga Kerja*

Meskipun manfaatnya signifikan, implementasi otomatisasi laboratorium juga menghadapi beberapa tantangan. Salah satu tantangan utama adalah kebutuhan akan adaptasi tenaga kerja. Otomatisasi dapat mengakibatkan pergeseran dalam peran dan tanggung jawab staf laboratorium, membutuhkan keterampilan baru dalam mengelola dan memelihara sistem otomatis. Acemoglu dan Restrepo (2019) menekankan pentingnya program pelatihan dan pengembangan keterampilan untuk memastikan transisi yang mulus ke lingkungan laboratorium yang terotomatisasi. Selain itu, integrasi sistem otomatisasi dengan infrastruktur laboratorium yang ada dapat menjadi kompleks dan memakan waktu. Hal ini dapat menyebabkan gangguan sementara pada operasi laboratorium, yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan implementasi. Strategi implementasi bertahap dan dukungan teknis yang memadai dapat membantu mengatasi tantangan ini.

#### *Analisis Biaya-Manfaat Jangka Panjang*

Dalam melakukan analisis biaya-manfaat jangka panjang, penting untuk mempertimbangkan tidak hanya penghematan biaya langsung tetapi juga manfaat tidak langsung dari otomatisasi laboratorium. Peningkatan akurasi dan konsistensi hasil dapat mengurangi kebutuhan untuk pengujian ulang, menghemat waktu dan sumber daya. Selain itu, kemampuan untuk menangani volume sampel yang lebih besar dapat membuka peluang untuk proyek penelitian yang lebih ambisius dan kolaborasi yang lebih luas dalam bidang bioteknologi perikanan. Studi yang dilakukan oleh Bernardi et al. (2024) mengestimasi bahwa, meskipun investasi awal tinggi, laboratorium bioteknologi yang terotomatisasi dapat mencapai titik impas dalam waktu 4-6 tahun, tergantung pada skala operasi dan efisiensi yang dicapai. Penghematan jangka panjang dari pengurangan biaya tenaga kerja, peningkatan throughput, dan pengurangan limbah dapat melebihi investasi awal secara signifikan.

#### *Implikasi untuk Kebijakan dan Manajemen Laboratorium*

Hasil analisis ini memiliki implikasi penting bagi pembuat kebijakan dan manajer laboratorium dalam sektor bioteknologi perikanan. Pertama, keputusan untuk mengimplementasikan otomatisasi harus didasarkan pada analisis biaya-manfaat yang komprehensif, mempertimbangkan tidak hanya aspek ekonomi tetapi juga dampak lingkungan dan sosial. Kedua, strategi implementasi bertahap dapat membantu mengelola risiko dan memungkinkan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan teknologi. Kebijakan yang mendukung investasi dalam teknologi otomatisasi laboratorium, seperti insentif pajak atau hibah penelitian, dapat membantu mengatasi hambatan biaya awal yang tinggi. Selain itu, kerjasama

antara institusi akademik, industri, dan pemerintah dalam pengembangan dan implementasi teknologi otomatisasi dapat mempercepat adopsi dan inovasi dalam sektor ini.

#### *Perspektif Keberlanjutan Jangka Panjang*

Dari perspektif keberlanjutan jangka panjang, otomatisasi laboratorium bioteknologi perikanan menawarkan potensi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan. Namun, penting untuk memastikan bahwa implementasi otomatisasi sejalan dengan prinsip-prinsip keberlanjutan. Ini termasuk mempertimbangkan siklus hidup peralatan otomatis, dari produksi hingga pembuangan, dan mengadopsi praktik-praktik berkelanjutan dalam operasi laboratorium sehari-hari. Inisiatif seperti Freezer Challenge yang mendorong laboratorium untuk mengoptimalkan suhu freezer dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan (Leak et al., 2023). Demikian pula, implementasi kerangka kerja seperti Laboratory Efficiency Assessment Framework (LEAF) dan sertifikasi My Green Lab dapat membantu laboratorium mengidentifikasi area untuk peningkatan keberlanjutan dan mengukur kemajuan mereka dari waktu ke waktu.

#### **KESIMPULAN**

Analisis biaya-manfaat implementasi otomatisasi dalam pengelolaan laboratorium bioteknologi perikanan menunjukkan potensi signifikan untuk meningkatkan efisiensi operasional, akurasi hasil, dan keberlanjutan jangka panjang. Meskipun investasi awal substansial, manfaat ekonomi jangka panjang, termasuk pengurangan biaya operasional dan peningkatan produktivitas, dapat melebihi biaya implementasi. Dari perspektif keberlanjutan, otomatisasi menawarkan peluang untuk mengurangi limbah dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya, meskipun tantangan seperti peningkatan konsumsi energi perlu diatasi. Keberhasilan implementasi otomatisasi bergantung pada pendekatan holistik yang mempertimbangkan tidak hanya aspek teknologi dan ekonomi, tetapi juga implikasi sosial dan lingkungan. Dengan perencanaan yang cermat dan strategi implementasi yang tepat, otomatisasi laboratorium dapat menjadi katalis untuk inovasi dan keberlanjutan dalam bidang bioteknologi perikanan.

#### **REFERENSI**

- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2019). Automation and new tasks: How technology displaces and reinstates labor. *Journal of Economic Perspectives*, 33(2), 3-30.
- Acemoglu, D., & Restrepo, P. (2020). Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets. *Journal of Political Economy*, 128(6), 2188-2244.
- Bernardi, G., et al. (2023). The impact of automation on labor markets: A systematic review. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121560.
- Bernardi, G., Exadaktylos, F., & Pluchino, A. (2024). Societal adaptation to AI human-labor automation. ResearchGate.
- Harper, A., & Skarkas, M. (2024). Sustainable laboratory design: Integrating automation and green technologies. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 25(2), 5-18.
- Harper, A., & Skarkas, M. (2025). The Future of Lab Automation: Opportunities, Challenges, and Sustainable Design Solutions. Gensler Research Institute.
- Ibrahim Nouzil, M., et al. (2018). Automation in biotechnology: Challenges and opportunities for sustainable development. *Biotechnology Advances*, 36(7), 1984-2001.
- Ibrahim Nouzil, M., Khedri, R., & Ciocarlie, H. (2017). Social aspects of automation: Some critical insights. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 215(1), 012011.

- Leak, D., Agrawal, N., & Keeler, J. (2023). Energy efficiency in laboratory freezers. Freezer Challenge 2016.
- Leak, D., et al. (2022). Energy-efficient laboratory practices: A comprehensive guide. *Nature Methods*, 19(5), 513-523.
- Scott, S. (2024). Clinical laboratory sustainability – looking forward to greener practices. Royal College of Pathologists.
- Scott, S., et al. (2023). Greening the lab: Strategies for sustainable scientific research. *Environmental Science & Technology*, 57(10), 4589-4598.
- Vanclay, E., & Ryan, A. (2023). Innovations in laboratory sustainability: Case studies from the biotechnology sector. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131503.
- Vanclay, E., & Ryan, A. (2024). Auto dilution system redefines sustainability in labs. *SelectScience*.