



Penerapan Teknik *Polymerase Chain Reaction* (PCR) dalam Mendeteksi Bakteri Patogen pada Sektor Peternakan dan Kesehatan Masyarakat

Made Dwi Ambara Putra^{1,*}, Ni Nyoman Sri Budayanti¹, I Putu Bayu Mayura¹

¹Program Studi Magister Ilmu Biomedik, Fakultas Kedokteran Universitas Udayana, Jl. P.B. Sudirman, Kampus Sudirman Denpasar, Bali, Indonesia

*putrambara140@gmail.com

Abstract

Polymerase Chain Reaction (PCR) technology has emerged as a significant breakthrough in the detection and management of diseases in the livestock sector and public health. This study aims to evaluate the effectiveness and applications of PCR in detecting pathogens in livestock and zoonotic diseases that can transfer from animals to humans. The research adopts a literature review approach, analyzing various scientific findings related to the application of PCR in different contexts. The results demonstrate that PCR offers advantages in sensitivity, specificity, and detection speed compared to conventional methods, enabling effective early intervention to prevent disease spread. Furthermore, innovations such as digital PCR, Point-of-Care PCR systems, and real-time data integration broaden its applicability, particularly in resource-limited settings. These findings underscore the importance of continuous research and development in PCR technology to enhance disease surveillance and global health management.

Keywords: PCR; livestock health; zoonosis; molecular diagnostics; PCR technology

Abstrak

Teknologi PCR (Polymerase Chain Reaction) telah menjadi terobosan signifikan dalam deteksi dan pengelolaan penyakit pada sektor peternakan dan kesehatan masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas dan aplikasi PCR dalam mendeteksi patogen pada hewan ternak serta penyakit zoonotik yang dapat berpindah dari hewan ke manusia. Metode penelitian menggunakan pendekatan studi literatur yang menganalisis berbagai temuan ilmiah terkait aplikasi PCR di berbagai konteks. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PCR menawarkan keunggulan dalam sensitivitas, spesifisitas, dan kecepatan deteksi dibandingkan metode konvensional, memungkinkan intervensi dini yang efektif untuk mencegah penyebaran penyakit. Selain itu, inovasi seperti PCR digital, sistem Point-of-Care berbasis PCR, dan integrasi data waktu nyata memperluas cakupan aplikasinya, terutama di daerah dengan sumber daya terbatas. Temuan ini mendukung pentingnya penelitian dan pengembangan berkelanjutan dalam teknologi PCR untuk meningkatkan pengawasan penyakit dan pengelolaan kesehatan global.

Kata-kata kunci: PCR; kesehatan ternak; zoonosis; diagnostik molekuler; teknologi PCR

Pendahuluan

Deteksi dini terhadap keberadaan bakteri patogen merupakan hal krusial dalam konteks peternakan dan kesehatan masyarakat guna mencegah munculnya dampak negatif pada produksi dan kesehatan ternak serta keamanan pangan (Garcia *et al.*, 2020; Neethirajan *et al.*, 2018; Vidic *et al.*, 2017). Identifikasi penyakit secara cepat akan memungkinkan pemberian

intervensi tepat waktu, misalnya melalui karantina, pengobatan atau bahkan pemusnahan, sehingga mampu menekan laju penyebaran wabah penyakit dan potensi kerugian ekonomi. Sebagai contoh, deteksi awal patogen seperti *E. coli* pada ternak dapat mencegah masuknya bakteri tersebut ke dalam rantai pangan yang dapat menyebabkan krisis kesehatan masyarakat (Newell & La Ragione, 2018).

Teknik diagnostik yang mutakhir, termasuk PCR (*polymerase chain reaction*), memainkan peran vital dalam upaya ini melalui penyediaan hasil yang akurat dan juga responsif (Das *et al.*, 2024). PCR mampu menyediakan hasil deteksi yang spesifik dan sensitif atas DNA dan RNA dari patogen (Loderstädt *et al.*, 2021). Dalam konteks klinis, PCR telah digunakan untuk deteksi cepat patogen seperti virus influenza, SARS-CoV-2, dan bakteri penyebab tuberkulosis. Selain itu, PCR juga dapat dikustomisasi untuk mendeteksi berbagai jenis patogen, dengan menggunakan set primer khusus yang dirancang untuk menandai sekuens genetik spesifik dari patogen target (Johnson *et al.*, 2013). Hal ini memungkinkan penggunaan PCR dalam pemantauan lingkungan dan pengujian keamanan makanan, di mana patogen perlu dideteksi dan diidentifikasi dengan cepat untuk mencegah penularan penyakit ke manusia (van Seventer & Hochberg, 2016).

Penelitian ini bertujuan untuk menelaah literatur dalam rangka mengevaluasi efektivitas dan aplikasi PCR pada sektor peternakan dan kesehatan masyarakat. Penelitian ini penting dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa hal. Pertama, banyak studi yang telah mengeksplorasi efektivitas penggunaan PCR dalam konteks klinis, misalnya sensitivitas dan spesifisitasnya yang tinggi dalam mendiagnosis invasive candidiasis (Avni *et al.*, 2011) atau mendeteksi *Mycobacterium tuberculosis* dari sampel patologis dalam waktu kurang dari dua jam (Babafemi *et al.*, 2017). Namun demikian, masih sedikit yang mengintegrasikan temuan ini dalam bidang peternakan dan kesehatan masyarakat secara lebih luas. Evaluasi lintas sektor dapat memberikan wawasan baru mengenai variabilitas efektivitas tersebut berdasarkan jenis sampel atau patogen. Selain itu, terdapat potensi optimalisasi metode dan protokol PCR yang ada untuk penggunaan di lapangan (Reiter & Pfaffl, 2011), khususnya dalam sektor peternakan dan kesehatan masyarakat yang mungkin menghadapi tantangan unik seperti variasi kondisi sampel dan akses ke teknologi.

Penelitian ini memberikan kontribusi sebagai berikut. Pertama, hasil telaah dapat membantu meningkatkan respons terhadap wabah penyakit zoonotik, yang dapat berasal dari peternakan ke manusia, dan meningkatkan keamanan pangan dengan mendeteksi patogen di tahap awal. Kedua, dengan memahami penggunaan PCR, efisiensi dalam mengawasi dan mengendalikan penyakit pada hewan dapat lebih ditingkatkan, sehingga mampu mengurangi

risiko kesehatan publik dan kerugian ekonomi. Hasil dari reviu ini juga dapat menginformasi pembuat kebijakan untuk mengembangkan regulasi yang mendukung penggunaan praktik diagnostik terbaik, serta mendorong inovasi lebih lanjut dalam teknologi diagnostik, memastikan kesehatan masyarakat dan mendukung stabilitas industri peternakan dengan lebih efektif.

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur yang mengkaji berbagai penelitian tentang penerapan PCR dalam deteksi bakteri patogen. Data dikumpulkan dari jurnal-jurnal ilmiah yang membahas tentang kemajuan teknologi PCR dan aplikasinya dalam berbagai studi kasus peternakan dan kesehatan masyarakat. Tinjauan secara menyeluruh ini tidak hanya menyoroti kemajuan teknologi dalam metode PCR, tetapi juga menilai efikasinya dalam skenario dunia nyata. Dengan menganalisis studi yang menyediakan detail peran PCR dalam meningkatkan kecepatan dan akurasi diagnostik, penelitian ini memberikan tinjauan kritis terhadap keadaan saat ini dari teknologi PCR dan membahas area potensial untuk penelitian dan pengembangan aplikasinya di masa depan. Pendekatan metodologis ini mampu memastikan bahwa temuan-temuan dari studi terdahulu telah berdasarkan bukti yang terdokumentasi dan mencerminkan perkembangan terbaru dalam bidang tertentu (Snyder, 2019).

Hasil dan Pembahasan

PCR sebagai Alat Pendeteksi Patogen

Penggunaan teknologi PCR (*polymerase chain reaction*) menjadi terobosan dalam mendeteksi patogen, khususnya bakteri yang menyebabkan penyakit gastrointestinal di daerah tropis (van Seventer & Hochberg, 2016). Penelitian menunjukkan bahwa metode PCR telah berkembang signifikan dalam meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas pendeteksian patogen secara cepat dan akurat dari sampel feses (Loderstädt *et al.*, 2021), sehingga berkontribusi besar dalam pengendalian penyakit di wilayah dengan sumber daya terbatas.

PCR memungkinkan deteksi dan identifikasi cepat bakteri patogen karena metode ini dapat memperbanyak DNA patogen dalam sampel dengan segera (Váradi *et al.*, 2017). Hal ini sangat penting di daerah tropis, di mana penyakit seperti gastroenteritis sering kali tidak terdiagnosis dengan cepat karena keterbatasan dari teknik diagnostik tradisional yang memakan waktu dan cenderung kurang sensitif (Kramme *et al.*, 2022). Dengan demikian,

teknologi PCR memungkinkan dokter dan tenaga kesehatan untuk melakukan diagnosa yang lebih cepat dan akurat serta penanganan yang lebih efektif terhadap penyakit.

Penggunaan PCR dalam diagnostik juga telah terbukti sangat baik dalam membedakan antara infeksi dan kolonisasi oleh patogen (Avni *et al.*, 2011), sebuah aspek penting dalam pengelolaan penyakit di daerah dengan tingkat kekebalan semipermanen akibat paparan berulang. Secara khusus, PCR telah berhasil diterapkan dalam pengujian berkala untuk mendeteksi penyebab gastroenteritis bakteri di laboratorium di negara-negara industri barat (Loderstädt *et al.*, 2021), di mana metode ini telah menjadi standar baru untuk skrining dengan analisis kultur dan pengujian resistensi dilakukan hanya jika hasil PCR positif (Vasala *et al.*, 2020). Beberapa studi juga menyebutkan bahwa implementasi panel PCR dapat mengurangi biaya (Quan *et al.*, 2018), berkat penggunaan chip termoplastik sekali pakai dan proses manufaktur *roll-to-roll* yang dapat diukur, yang memungkinkan produksi massal dengan biaya yang lebih rendah (Fernández-Carballo *et al.*, 2016).

Penerapan PCR dalam Sektor Peternakan

Penggunaan teknologi PCR dapat berperan penting dalam memonitor kesehatan ternak. Menurut Vidic *et al.* (2017), deteksi patogen merupakan langkah krusial dalam hal diagnostik, pemberian pengobatan yang efektif terhadap penyakit infeksi pada hewan, serta pengelolaan pengendalian di peternakan dan kondisi lapangan. Metode konvensional seperti kultur mikroorganisme sering kali memakan waktu dan tenaga, sedangkan PCR menawarkan pendekatan yang lebih spesifik, sensitif, dan cepat.

Studi yang dilakukan oleh Garcia *et al.* (2020) menekankan bahwa PCR mampu mendeteksi lebih awal penyebaran penyakit infeksi pada ternak, memiliki risiko yang tinggi terhadap keamanan pangan. Penyakit ini tidak hanya mengancam kesehatan hewan tetapi juga memiliki dampak signifikan terhadap tingkat biaya dan ketersediaan pangan. Dengan demikian, PCR memungkinkan peternak untuk mengambil langkah cepat dalam mengisolasi hewan yang terinfeksi dan mencegah penyebaran penyakit.

Dalam konteks penerapan teknologi PCR pada peternakan, Neethirajan (2017) mengungkapkan bahwa pengembangan biosensor berbasis PCR dapat menjadi instrumen diagnostik yang efektif untuk mendeteksi dan memonitor patogen pada hewan. Termasuk dalam hal ini adalah penerapannya dalam mendeteksi virus influenza pada burung yang sangat diperlukan pada industri unggas. Secara keseluruhan, penerapan PCR dalam industri peternakan mendukung pemantauan kesehatan hewan yang lebih akurat dan cepat, mengurangi

risiko penyebaran penyakit, dan membantu mempertahankan produktivitas serta keberlanjutan produksi hewan (Garcia *et al.*, 2020; Neethirajan *et al.*, 2018; Vidic *et al.*, 2017).

PCR juga menjadi teknologi yang sangat penting dalam mendeteksi penyakit zoonotik yang dapat berpindah dari hewan ke manusia. Penelitian oleh Pesapane *et al.* (2013) menunjukkan bahwa PCR terbukti efektif untuk memantau dan mengevaluasi transmisi bakteri *E. coli* antara mongoose bintik-bintik dan manusia sehingga memberikan wawasan bermakna mengenai jalur transmisi patogen antara manusia dan satwa liar. Dalam studi lanjutan oleh Gebreyes *et al.* (2020), PCR dapat berperan sebagai instrumen kunci pengawasan patogen zoonotik yang berpotensi menyebabkan wabah penyakit di antara populasi hewan dan manusia. Temuan ini menggarisbawahi bagaimana PCR memperkuat kemampuan deteksi dan respons terhadap infeksi zoonotik.

Zhang *et al.* (2024) menambahkan bahwa teknologi PCR dapat meningkatkan sistem surveilans dan respons untuk penyakit zoonotik yang muncul, dengan penekanan pada bagaimana PCR dapat memfasilitasi pemantauan *real-time* dan prediksi risiko wabah, membantu dalam deteksi dini dan intervensi yang ditargetkan selama wabah. Di sisi lain, Pawar *et al.* (2024) mengungkap potensi penggunaan PCR dalam memantau penyakit zoonotik pada reptil, yang sering kali merupakan pembawa patogen zoonotik yang kurang dieksplorasi. Menariknya, penelitian oleh Khurana *et al.* (2015) membawa perspektif baru dengan menyoroti peran kuda dalam transmisi penyakit zoonotik kepada manusia. Studi ini mengidentifikasi beberapa penyakit zoonotik signifikan seperti *rabies equine*, *salmonellosis*, dan infeksi *Staphylococcus aureus* yang resisten terhadap *methicillin* (MRSA), dengan mana semua dapat diidentifikasi dan dimonitor melalui teknologi PCR untuk mengurangi risikonya pada manusia.

Penerapan PCR dalam Sektor Kesehatan Masyarakat

Teknologi PCR sebagai inovasi penting yang telah merevolusi sektor kesehatan masyarakat, khususnya dalam deteksi dan pengendalian penyakit menular, surveilans zoonotik, serta keamanan pangan. Dalam hal deteksi penyakit, PCR memungkinkan identifikasi patogen dengan cepat dan akurat, bahkan dalam jumlah yang sangat kecil, sehingga mendukung diagnosis dini dan pengambilan tindakan yang tepat waktu. Penerapan teknologi PCR dalam sektor kesehatan masyarakat juga berperan penting dalam pengendalian penyakit menular dengan mempercepat proses diagnostic, misalnya mendeteksi virus yang menyebabkan penyakit berat seperti demam berdarah dan *cholera*, pengelolaan wabah, dan pengawasan kesehatan lingkungan. Dalam konteks wabah demam berdarah, *multiplex real-*

time PCR digunakan untuk deteksi simultan beberapa virus penyebab sindrom demam berdarah, memberikan kecepatan dan efektivitas dalam respons kesehatan publik terhadap wabah penyakit (Choi & Kim, 2023). Sementara itu, untuk *cholera*, nilai *cycle threshold* (Ct) dari PCR digunakan untuk prediksi dan manajemen wabah *cholera*, memungkinkan intervensi kesehatan masyarakat yang lebih tepat dan cepat dalam merespons peningkatan kasus (Akingbola *et al.*, 2024). Di sisi lain, penerapan PCR dalam konteks kesehatan masyarakat terutama berguna untuk mengidentifikasi kontaminasi virus pada produk makanan, yang penting untuk mencegah penyakit bawaan makanan (Stals *et al.*, 2013).

Keseluruhan hasil studi ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi PCR dalam pengawasan kesehatan hewan dan kesehatan masyarakat tidak hanya meningkatkan pemahaman tentang dinamika transmisi penyakit tetapi juga membantu mengembangkan strategi respons yang lebih efektif dalam menghadapi ancaman zoonotik yang berkelanjutan dan senantiasa berkembang. Hal ini menegaskan pentingnya teknologi canggih dalam pengendalian penyakit zoonotik global dan peran krusialnya dalam memperkuat tingkat kesehatan penduduk dunia.

Tantangan dan Batasan PCR

Teknologi PCR, meskipun berperan signifikan dalam diagnostik dan penelitian, memiliki beberapa keterbatasan signifikan yang dapat mempengaruhi efektivitasnya dalam lingkungan tertentu, khususnya di lokasi dengan sumber daya terbatas. Keterbatasan-keterbatasan ini mencakup isu spesifisitas, sensitivitas, dan biaya operasional yang tinggi, serta kebutuhan untuk optimasi dan standarisasi metodologi. Pertama, spesifisitas dan sensitivitas PCR dapat sangat bergantung pada desain primer dan kondisi reaksi. Menurut Fleitas *et al.* (2021), meskipun PCR multiplex dapat secara efisien mendeteksi patogen multipel, batasan dalam spesifisitasnya mungkin mengurangi kemampuannya untuk membedakan antar patogen yang serupa, yang bisa mengarah pada interpretasi yang salah dari hasil PCR. Hal ini menegaskan pentingnya desain primer yang cermat dan validasi target secara akurat untuk menghindari hasil positif palsu atau negatif palsu.

Hashim dan Al-Shuhaib (2019) juga menunjukkan bahwa biaya tinggi dan prosedur teknis yang kompleks terkait dengan beberapa metode PCR, seperti PCR-RFLP dan PCR-SSCP, menjadikannya kurang praktis untuk diimplementasikan di laboratorium dengan sumber daya terbatas. Ini menyoroti perlunya solusi yang lebih terjangkau dan prosedur yang lebih sederhana yang dapat diakses oleh pengaturan dengan berbagai tingkat kemampuan teknis dan anggaran. Yang dan Rothman (2004) menambahkan bahwa meskipun PCR telah

mempermudah diagnostik penyakit infeksi, adopsinya secara luas dalam pengaturan klinis sering terkendala oleh kebutuhan akan infrastruktur laboratorium canggih dan teknisi yang terlatih. Mereka menekankan perlunya lebih banyak otomatisasi dan pengembangan metode PCR yang dapat mendeteksi banyak target secara simultan untuk mengatasi keterbatasan ini.

Selain itu, keakuratan PCR sangat bergantung pada integritas dan penanganan sampel. Seperti yang dibahas oleh Hajia (2018), kondisi kerja yang tidak optimal dan kesalahan dalam pengaturan PCR dapat menyebabkan variabilitas yang besar dalam hasil. Ini menuntut protokol standar yang ketat dan pelatihan yang memadai bagi operator untuk memastikan hasil yang konsisten. Dalam konteks deteksi penyakit dengan intensitas infeksi yang rendah, seperti yang ditemukan oleh Benjamin-Chung *et al.* (2020), PCR menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan metode Kato-Katz, menunjukkan keefektifannya dalam surveilans penyakit sebagai upaya eliminasi penyakit. Unruh *et al.* (2024) lebih lanjut menekankan pentingnya mengembangkan kerangka kerja standar untuk validasi metode tes grup yang memanfaatkan PCR, menyoroti kebutuhan akan protokol yang jelas dan standar dalam pengujian diagnostik.

Arah Penerapan PCR Masa Depan

Teknologi PCR telah mengalami banyak kemajuan dalam beberapa tahun terakhir, dengan inovasi yang mengarah pada aplikasi yang lebih praktis, hemat biaya, dan efisien di berbagai bidang, termasuk diagnostik penyakit menular. Salah satu pengembangan utama adalah teknologi PCR digital (dPCR), yang menawarkan keunggulan dalam hal sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi dibandingkan dengan PCR konvensional. Sreejith *et al.* (2018) menggarisbawahi bahwa dPCR dapat memberikan analisis kuantitatif yang lebih presisi dengan mengurangi risiko hambatan PCR dan memungkinkan deteksi mutasi langka, meskipun masih ada tantangan dalam membuat sistem yang portabel dan sepenuhnya otomatis.

Tsokana *et al.* (2023) mengungkap bagaimana dPCR digunakan secara efektif untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi parasit pada hewan ternak, dengan penerapan khusus pada penyakit parasit seperti *coccidiosis* pada unggas dan infeksi parasit pada *ruminansia*. Sementara itu, Griffiths *et al.* (2023) menguraikan penerapan dPCR untuk mengukur proporsi spesifik spesies hewan dalam produk makanan dan pakan, termasuk pengembangan assay untuk tujuh spesies hewan baru, yaitu kuda, keledai, bebek, kanguru, unta, kerbau air, dan buaya. Dalam konteks kesehatan masyarakat, Tiwari *et al.* (2022) mengungkap efektivitas dPCR untuk mengukur secara kuantitatif mikroorganisme di berbagai lingkungan akuatik,

dengan peningkatan penggunaan baru-baru ini dalam monitoring air limbah untuk mendeteksi RNA virus SARS-CoV-2, yang menyebabkan COVID-19.

Selanjutnya, teknologi integrasi data *real-time* dalam perangkat diagnostik telah memperluas kapasitas PCR untuk digunakan dalam pemodelan prediktif dan pemantauan penyakit menular secara langsung. Menurut Udegbe *et al.* (2023), integrasi data *real-time* memungkinkan pengumpulan dan analisis informasi dari berbagai sumber, termasuk perangkat diagnostik, untuk mendeteksi pola dan anomali yang dapat menjadi tanda awal wabah penyakit, mendukung intervensi yang lebih proaktif.

Petralia dan Conoci (2017) menyoroti pengembangan sistem *Point-of-Care* (PoC) berbasis PCR, yang dirancang untuk lingkungan terdesentralisasi. Sistem ini mengintegrasikan semua langkah analisis molekuler, termasuk ekstraksi sampel, amplifikasi PCR, dan deteksi hasil, ke dalam perangkat portabel yang mudah digunakan bahkan oleh personel yang tidak terlatih. Inovasi ini menawarkan potensi besar untuk aplikasi diagnostik di area dengan sumber daya terbatas. Zhu *et al.* (2020) menambahkan bahwa sistem PCR berbasis mikrofluida telah memberikan solusi yang lebih cepat dan portabel dengan menggunakan chip miniatur untuk reaksi PCR. Teknologi ini memungkinkan analisis DNA dari sampel dengan volume kecil, mengurangi waktu reaksi secara signifikan dan mempermudah pengujian di lokasi.

Secara keseluruhan, kemajuan dalam teknologi PCR, termasuk dPCR, PoC berbasis PCR, dan integrasi data *real-time*, telah mengubah lanskap diagnostik modern. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan aksesibilitas PCR tetapi juga memungkinkan aplikasi yang lebih luas dalam pemantauan kesehatan global, terutama di pengaturan dengan sumber daya terbatas. Kombinasi dari berbagai teknologi ini menunjukkan potensi besar dalam menangani tantangan diagnostik di masa depan. Tabel 1 menyajikan rangkuman hasil penelitian yang mencakup kategori temuan, penjabaran singkat hasil temuan dan referensi-referensi kunci.

Tabel 1. Rangkuman Hasil Penelitian

Kategori	Temuan Utama	Referensi Kunci
Kinerja PCR	PCR menawarkan sensitivitas dan spesifisitas yang tinggi, memungkinkan deteksi patogen yang cepat dan akurat dari berbagai sampel.	Loderstädt <i>et al.</i> , 2021; Váradi <i>et al.</i> , 2017; Kramme <i>et al.</i> , 2022
Perkembangan Teknologi PCR	dalam Inovasi termasuk PCR digital dan sistem PCR <i>Point-of-Care</i> , yang meningkatkan penerapannya di area dengan sumber daya terbatas.	Avni <i>et al.</i> , 2011; Johnson <i>et al.</i> , 2013; Fernández-Carballo <i>et al.</i> , 2016

Kategori	Temuan Utama	Referensi Kunci
PCR dalam Kesehatan Ternak	PCR sangat penting untuk deteksi penyakit dini pada ternak, meningkatkan keamanan pangan dan hasil ekonomi.	Garcia <i>et al.</i> , 2020; Vidic <i>et al.</i> , 2017; Neethirajan, 2017
PCR dalam Kesehatan Masyarakat	PCR meningkatkan pengawasan dan pengelolaan penyakit, terutama untuk penyakit zoonosis yang dapat ditularkan dari hewan ke manusia.	Pesapane <i>et al.</i> , 2013; Gebreyes <i>et al.</i> , 2020
Tantangan dan Batasan	Biaya tinggi, kebutuhan akan keahlian teknis, dan masalah dengan spesifisitas serta integritas sampel dapat membatasi efektivitas PCR.	Fleitas <i>et al.</i> , 2021; Hashim dan Al-Shuhaib, 2019; Hajia, 2018
Arah Masa Depan	Pengembangan berkelanjutan dalam teknologi PCR bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, efektivitas biaya, dan aksesibilitasnya.	Sreejith <i>et al.</i> , 2018; Tsokana <i>et al.</i> , 2023; Griffiths <i>et al.</i> , 2023; Tiwari <i>et al.</i> , 2022

Kesimpulan

Dalam rangka mengevaluasi efektivitas dan penerapan PCR pada sektor peternakan dan kesehatan masyarakat, kajian literatur yang dilakukan mengungkapkan kontribusi signifikan teknologi ini dalam meningkatkan respons terhadap wabah penyakit zoonotik yang berpotensi berasal dari peternakan ke manusia. PCR, sebagai metode diagnostik yang sensitif dan spesifik, memungkinkan deteksi patogen secara cepat dan akurat, yang penting dalam pencegahan penyebaran penyakit zoonotik, peningkatan keamanan pangan, serta mengurangi risiko kesehatan masyarakat dan kerugian ekonomi. Efisiensi PCR dalam memonitor dan mengendalikan penyakit pada hewan sangat membantu dalam pengambilan keputusan intervensi yang tepat waktu, seperti karantina atau pengobatan, yang berkontribusi pada pengurangan risiko penyakit lintas spesies.

Meski PCR memiliki banyak kelebihan, terdapat tantangan signifikan, khususnya dalam lingkungan dengan sumber daya terbatas, yang meliputi aspek biaya tinggi dan kebutuhan akan infrastruktur laboratorium yang canggih. Namun, kemajuan teknologi seperti PCR digital (dPCR) dan sistem *point-of-care* (PoC) berbasis PCR menawarkan solusi potensial dengan biaya lebih efektif dan mudah diakses. Diharapkan, pengembangan lebih lanjut dalam teknologi PCR akan menciptakan solusi yang lebih efisien, portabel, dan otomatis untuk penggunaan luas di daerah terbatas sumber daya. Integrasi PCR dengan sistem pemantauan global juga dapat memperkuat pengawasan penyakit dan mendukung kesiapsiagaan terhadap

wabah penyakit. Oleh karena itu, upaya-upaya untuk senantiasa mengoptimalkan dan mengadaptasi inovasi dalam teknologi PCR adalah kunci untuk mengatasi tantangan kesehatan masyarakat, keamanan pangan, dan keberlanjutan industri peternakan.

Daftar Pustaka

- Avni, T., Leibovici, L., & Paul, M. (2011). PCR diagnosis of invasive candidiasis: Systematic review and meta-analysis. *Journal of Clinical Microbiology*, *49*(2), 665–670. <https://doi.org/10.1128/JCM.01602-10>
- Babafemi, E. O., Cherian, B. P., Banting, L., Mills, G. A., & Ngianga, K. (2017). Effectiveness of real-time polymerase chain reaction assay for the detection of Mycobacterium tuberculosis in pathological samples: A systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews*, *6*(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s13643-017-0608-2>
- Benjamin-Chung, J., Pilotte, N., Ercumen, A., Grant, J. R., Maasch, J. R. M. A., Gonzalez, A. M., Ester, A. C., Arnold, B. F., Rahman, M., Haque, R., Hubbard, A. E., Luby, S. P., Williams, S. A., & Colford, J. M. (2020). Comparison of multi-parallel qPCR and double-slide kato-katz for detection of soil-transmitted helminth infection among children in rural Bangladesh. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, *14*(4), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008087>
- Das, B., Ellis, M., & Sahoo, M. (2024). Veterinary diagnostics: growth, trends, and impact. In M. Suar, N. Misra, & P. K. Singh (Eds.), *Evolving Landscape of Molecular Diagnostics: Applications and Techniques* (pp. 227–242). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99316-6.00007-X>
- Fernández-Carballo, B. L., McGuinness, I., McBeth, C., Kalashnikov, M., Borrós, S., Sharon, A., & Sauer-Budge, A. F. (2016). Low-cost, real-time, continuous flow PCR system for pathogen detection. *Biomedical Microdevices*, *18*(2), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10544-016-0060-4>
- Fleitas, P. E., Vargas, P. A., Caro, N., Almazan, M. C., Echazú, A., Juárez, M., Cajal, P., Krolewiecki, A. J., Nasser, J. R., & Cimino, R. O. (2021). Scope and limitations of a multiplex conventional PCR for the diagnosis of *S. stercoralis* and hookworms. *Brazilian Journal of Infectious Diseases*, *25*(6), 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.bjid.2021.101649>
- Francisca Chibugo Udegbe, Nwankwo, E. I., Geneva Tamunobarafiri Igwama, & Olaboye, J. A. (2023). Real-Time data integration in diagnostic devices for predictive modeling of infectious disease outbreaks. *Computer Science & IT Research Journal*, *4*(3), 525–545. <https://doi.org/10.51594/csitrj.v4i3.1502>
- Garcia, S. N., Osburn, B. I., & Jay-Russell, M. T. (2020). One Health for Food Safety, Food Security, and Sustainable Food Production. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*(January), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00001>
- Gebreyes, W. A., Jackwood, D., de Oliveira, C. J. B., Lee, C.-W., Hoet, A. E., & Thakur, S. (2020). Molecular Epidemiology of Infectious Zoonotic and Livestock Diseases. *Microbiology Spectrum*, *8*(2), 1–21. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.ame-0011-2019>
- Hajia, M. (2018). Limitations of Different PCR Protocols Used in Diagnostic Laboratories: A Short Review. *Modern Medical Laboratory Journal*, *1*(1), 1–6. <https://doi.org/10.30699/mmlj17-01-01>
- Hashim, H. O., & Al-Shuhaib, M. B. S. (2019). Exploring the potential and limitations of PCR-RFLP and PCR-SSCP for SNP detection: A review. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, *6*(4), 137–144. <https://doi.org/10.29252/JABR.06.04.02>
- Johnson, G., Nolan, T., & Bustin, S. A. (2013). Real-Time Quantitative PCR, Pathogen

- Detection and MIQE. In M. Wilks (Ed.), *PCR Detection of Microbial Pathogens* (pp. 1–16). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-353-4_1
- Khurana, S. K., Dhama, K., Prasad, M., Karthik, K., & Tiwari, R. (2015). Zoonotic Pathogens transmitted from Equines: diagnostics and zoonosis. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 2(March), 23–36.
- Kramme, S., Dähne, T., Fomenko, A., & Panning, M. (2022). Acute Viral Gastrointestinal (GI) Infections in the Tropics—A Role for Cartridge-Based Multiplex PCR Panels? *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/tropicalmed7050080>
- Loderstädt, U., Hagen, R. M., Hahn, A., & Frickmann, H. (2021). New developments in pcr-based diagnostics for bacterial pathogens causing gastrointestinal infections—a narrative mini-review on challenges in the tropics. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/tropicalmed6020096>
- Neethirajan, S. (2017). Recent advances in wearable sensors for animal health management. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 12, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2016.11.004>
- Neethirajan, S., Ragavan, K. V., & Weng, X. (2018). Agro-defense: Biosensors for food from healthy crops and animals. *Trends in Food Science and Technology*, 73, 25–44. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.12.005>
- Newell, D. G., & La Ragione, R. M. (2018). Enterohaemorrhagic and other Shiga toxin-producing *Escherichia coli* (STEC): Where are we now regarding diagnostics and control strategies? *Transboundary and Emerging Diseases*, 65(May 2017), 49–71. <https://doi.org/10.1111/tbed.12789>
- Pawar, S., Shinde, R., & Shinde, A. R. (2024). Zoonotic Pathogens in Wildlife Surveillance, Transmission Dynamics, and Public Health Risks of Infectious Diseases Transmitted between Animals and Humans. *African Journal of Biological Sciences (South Africa)*, 6, 2559–2568. <https://doi.org/10.33472/AFJBS.6.Si2.2024.2559-2568>
- Pesapane, R., Ponder, M., & Alexander, K. A. (2013). Tracking pathogen transmission at the human-wildlife interface: Banded mongoose and *Escherichia coli*. *EcoHealth*, 10(2), 115–128. <https://doi.org/10.1007/s10393-013-0838-2>
- Petralia, S., & Conoci, S. (2017). PCR technologies for point of care testing: Progress and perspectives. *ACS Sensors*, 2(7), 876–891. <https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00299>
- Quan, P. L., Sauzade, M., & Brouzes, E. (2018). dPCR: A technology review. *Sensors (Switzerland)*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/s18041271>
- Reiter, M., & Pfaffl, M. W. (2011). RT-PCR Optimization Strategies. In *PCR Troubleshooting and Optimization: The Essential Guide* (pp. 97–118).
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104(July), 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sreejith, K. R., Ooi, C. H., Jin, J., Dao, D. V., & Nguyen, N. T. (2018). Digital polymerase chain reaction technology-recent advances and future perspectives. *Lab on a Chip*, 18(24), 3717–3732. <https://doi.org/10.1039/c8lc00990b>
- Unruh, L. A. H., Crone, M. A., Freemont, P. S., & Chindelevitch, L. (2024). A standardised, high-throughput approach to diagnostic group testing method validation. *MedRxiv*, 1–12.
- van Seventer, J. M., & Hochberg, N. S. (2016). Principles of Infectious Diseases: Transmission, Diagnosis, Prevention, and Control. *International Encyclopedia of Public Health*, January, 22–39. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803678-5.00516-6>
- Váradi, L., Luo, J. L., Hibbs, D. E., Perry, J. D., Anderson, R. J., Orega, S., & Groundwater, P. W. (2017). Methods for the detection and identification of pathogenic bacteria: Past, present, and future. *Chemical Society Reviews*, 46(16), 4818–4832.

- <https://doi.org/10.1039/c6cs00693k>
- Vasala, A., Hytönen, V. P., & Laitinen, O. H. (2020). Modern Tools for Rapid Diagnostics of Antimicrobial Resistance. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 10(July). <https://doi.org/10.3389/fcimb.2020.00308>
- Vidic, J., Manzano, M., Chang, C. M., & Jaffrezic-Renault, N. (2017). Advanced biosensors for detection of pathogens related to livestock and poultry. *Veterinary Research*, 48(1), 1–22. <https://doi.org/10.1186/s13567-017-0418-5>
- Yang, S., & Rothman, R. E. (2004). PCR-based diagnostics for infectious diseases: uses, limitations, and future applications in acute-care settings. *The Lancet - Infectious Diseases*, 4, 337–348. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.09.003>
- Zhang, L., Guo, W., & Lv, C. (2024). Modern technologies and solutions to enhance surveillance and response systems for emerging zoonotic diseases. *Science in One Health*, 3(December 2023), 100061. <https://doi.org/10.1016/j.soh.2023.100061>
- Zhu, H., Zhang, H., Xu, Y., Laššáková, S., Korabečná, M., & Neužil, P. (2020). PCR past, present and future. *BioTechniques*, 69(4), 317–325. <https://doi.org/10.2144/BTN-2020-0057>