



Review: Pendekatan Rekayasa Optik untuk Penilaian Mutu Benih Secara Non-Destruktif: Peran Biospeckle dalam Penelitian Patologi Benih

Riski Meliya Ningsih^{1*}, Lesta², Geby³

^{1,2,3}Pertanian Presisi, Rekayasa Elektro dan Industri Pertanian, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Jalan Timah Raya, Sungailiat, Bangka, 33211, Indonesia

ARTIKEL INFO

Sejarah artikel
Diterima 23/05/2025
Diterima dalam bentuk revisi 04/08/2025
Diterima dan disetujui 19/09/2025
Terbit online 03/02/2026

Kata kunci
Deep learning
Machine learning
Mutu benih
Non-destruktif
Pencitraan

ABSTRAK

Perkembangan teknologi rekayasa optik telah membawa perubahan signifikan dalam sistem penilaian mutu benih, melalui penerapan metode non-destruktif seperti *Biospeckle Laser Imaging* (BLI). Kajian ini bertujuan untuk mereview secara sistematis publikasi ilmiah terpilih dalam 10 tahun terakhir yang membahas aplikasi BLI, pencitraan multispektral dan hiperspektral, serta *Optical Coherence Tomography* (OCT), evaluasi kesehatan dan kualitas benih. Artikel dianalisis berdasarkan relevansi dengan topik, kebaaruan metode, dan fokus pada metode non-destruktif berbasis optik. Hasil analisis menunjukkan bahwa BLI mampu mendeteksi aktivitas metabolik, viabilitas, vigor, dan infeksi patogen pada berbagai jenis benih dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi, mencapai lebih dari 90%. Keunggulan utama teknik ini meliputi efisiensi waktu, sifat non-destruktif, serta ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional. Selain itu, integrasi teknik optik dengan algoritma *machine learning* dan *deep learning* terbukti mampu meningkatkan akurasi klasifikasi dan efisiensi diagnosis, seperti pada deteksi kontaminasi aflatoksin, kerusakan mekanis, dan identifikasi varietas benih. Namun, implementasi teknologi ini di tingkat lokal masih menghadapi tantangan berupa keterbatasan infrastruktur, rendahnya literasi teknologi, serta kebutuhan akan perangkat portabel dan protokol standar yang mudah diadopsi. Secara keseluruhan, pendekatan rekayasa optik berbasis BLI dan teknik pencitraan lainnya berpotensi besar menjadi standar baru dalam sistem penjaminan mutu benih yang presisi, efisien, dan ramah lingkungan. Rekomendasi utama diarahkan pada penguatan kolaborasi lintas sektor untuk mempercepat adopsi teknologi ini dalam mendukung pertanian presisi dan ketahanan pangan nasional.

© 2026 Politeknik Pembangunan Pertanian Manokwari



ABSTRACT

The advancement of optical engineering technologies has brought significant changes to seed quality assessment systems through the implementation of non-destructive methods such as Biospeckle Laser Imaging (BLI). This study aims to systematically review selected scientific publications from the past decade that discuss the applications of BLI, multispectral and hyperspectral imaging, and Optical Coherence Tomography (OCT) in evaluating seed health and quality. Articles were analyzed based on topic relevance, methodological novelty, and focus on optics-based non-destructive techniques. The analysis reveals that BLI can detect metabolic activity, viability, vigor, and pathogen infections in various seed types with remarkably high accuracy (over 90%). The key advantages of this technique lies in time efficiency, non-destructiveness, and environmental friendliness compared to conventional methods. Furthermore,

the integration of optical techniques with machine learning and deep learning algorithms has been proven to enhance classification accuracy and diagnostic efficiency, particularly in detecting aflatoxin contamination, mechanical damage, and seed variety identification. However, the local implementing of this technology still faces challenges, including infrastructure limitations, low technological literacy, and the need for portable devices and easily adoptable standardized protocols. Overall, BLI-based optical engineering approaches and other imaging techniques hold great potential to become the new standard for precise, efficient, and environmentally sustainable seed quality assurance systems. The primary recommendation emphasizes strengthening cross-sector collaboration to accelerate the adoption of this technology in supporting precision agriculture and national food security.

PENDAHULUAN

Evaluasi mutu benih memegang peranan penting dalam menjamin produktivitas pertanian dan ketahanan pangan nasional maupun global (Fonseca De Oliveira *et al.*, 2022; Vivas *et al.*, 2017). Menurut Xing *et al.* (2023) menunjukkan bahwa penurunan hasil panen akibat penggunaan benih bermutu rendah dan terkontaminasi patogen dapat mencapai 20–40% setiap tahun, yang berdampak signifikan pada pendapatan petani dan stabilitas pasokan pangan. Di Indonesia dan negara agraris lainnya, kebutuhan akan evaluasi mutu benih yang cepat, presisi, dan berkelanjutan semakin mendesak guna mendukung efisiensi produksi pertanian yang berkelanjutan.

Metode konvensional, seperti uji perkecambahan dan analisis biokimia, masih menjadi standar evaluasi mutu benih (Desai *et al.*, 2017; Pandiselvam *et al.*, 2020), namun memiliki keterbatasan signifikan, antara lain

sifatnya yang destruktif, waktu analisis lama, serta biaya relatif tinggi (Huang *et al.*, 2015). Di tingkat petani lokal, teknik ini juga sering kali kurang akurat ($\leq 70\%$) dan merusak sampel, sehingga kurang efektif untuk skala produksi dan pengawasan mutu yang lebih luas (Galletti *et al.*, 2020). Keterbatasan ini menjadi hambatan dalam mewujudkan sistem penjaminan mutu benih yang efisien dan handal.

Sebagai alternatif, teknologi rekayasa optik terkini menawarkan solusi non-invasif yang inovatif. Teknik *Biospeckle Laser Imaging* (BLI) memanfaatkan interferensi cahaya koheren untuk memantau aktivitas metabolik jaringan benih secara real-time, mendukung evaluasi viabilitas dan dormansi (Ansari *et al.*, 2018; Contado *et al.*, 2020). Selain itu, *Multispectral* dan *Hyperspectral Imaging* (MSI/HSI) mampu mendeteksi kontaminasi mikotoksin dan kerusakan internal

dengan presisi tinggi (Boelt *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018), sementara *Optical Coherence Tomography* (OCT) menyediakan visualisasi struktur internal benih secara tiga dimensi tanpa merusak sampel (Belin *et al.*, 2018; Bartolić *et al.*, 2022). Integrasi teknologi optik ini dengan kecerdasan buatan seperti *machine learning* memperkuat kapabilitas klasifikasi dan aplikasi di bidang patologi benih dan pertanian presisi (Saisanthosh *et al.*, 2017).

Meskipun teknologi optik non-destruktif telah terbukti efektif, adopsi di lapangan masih terkendala infrastruktur dan rendahnya literasi teknologi di tingkat petani (Nugroho *et al.*, 2021). Oleh karena itu pengkajian literatur ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana perkembangan platform hibrid yang mengintegrasikan *Biospeckle Laser Imaging* (BLI), *edge computing*, dan *algoritma deep learning* ringan untuk evaluasi kesehatan benih non-destruktif secara *real-time* dengan biaya produksi lebih rendah dibanding perangkat komersial. Sistem ini fokus pada deteksi viabilitas, pengukuran vigor, dan identifikasi kontaminasi patogen pada benih tanaman di agroekosistem tropis. Inovasi ini menjawab keterbatasan metode konvensional yang lamban dan destruktif serta rendahnya literasi teknologi di lapangan, sehingga diharapkan menjadi model aplikatif untuk penguatan sistem jaminan mutu benih berbasis *precision agriculture* di Indonesia. Kajian literatur sistematis ini dilakukan untuk memastikan pengembangan teknologi sesuai kebutuhan nyata lapangan dan mendukung transformasi digital pertanian.

METODE

Kajian sistematis ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan analisis kritis terhadap berbagai publikasi ilmiah yang membahas penerapan teknik rekayasa optik dalam evaluasi mutu benih secara non-destruktif. Proses seleksi artikel dilakukan melalui beberapa tahap. Pertama, pencarian literatur dilakukan di database ilmiah terkemuka seperti Scopus, Web of Science, dan Google Scholar dengan kata kunci terkait seperti "*biospeckle laser imaging*", "*seed quality assessment*", "*non-destructive seed evaluation*", dan "*optical coherence tomography*".

Artikel yang dipilih merupakan artikel publikasi 10 tahun terakhir dan memiliki fokus utama pada pengembangan atau aplikasi teknik optik untuk penilaian mutu benih. Dari hasil pencarian awal yang mencapai ratusan artikel, dilakukan penyaringan berdasarkan abstrak dan isi untuk memastikan relevansi dengan topik, sehingga diperoleh 40 artikel yang memenuhi kriteria. Studi-studi yang direview dalam kajian ini menggunakan berbagai perangkat optik seperti *biospeckle laser imaging*, *multispectral* dan *hyperspectral imaging*, *optical coherence tomography*, serta integrasi dengan metode *machine learning*. Studi yang hanya menggunakan metode destruktif atau tanpa teknologi optik serta yang tidak menyajikan data empiris dieliminasi dari kajian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Parameter Optik yang Relevan

Berdasarkan hasil sintesis berbagai studi terkini, teknik pencitraan optik telah menunjukkan efektivitas yang signifikan dalam menilai parameter fisiologis benih dan jaringan tanaman secara non-destruktif. Penelitian [Adamiak *et al.* \(2012\)](#) mengungkapkan korelasi negatif yang kuat ($r = -0,87$; $p < 0,01$) antara aktivitas *biospeckle* dengan perkembangan *Bull's Eye Rot* pada apel, ditunjukkan oleh penurunan nilai *Inertia Moment* (IM) dari 125 ± 15 menjadi 45 ± 8 seiring memburuknya kondisi jaringan. Temuan konsisten dilaporkan [Ansari *et al.* \(2018\)](#) yang mengamati perbedaan

bermakna ($p < 0,05$) parameter *biospeckle* antara jaringan sehat ($IM = 180 \pm 20$) dan rusak ($IM = 75 \pm 15$), mencerminkan penurunan aktivitas metabolik sebesar 58,3%.

Dalam konteks benih jagung, [Bartolić *et al.* \(2022\)](#) berhasil mengonstruksi model PLS-DA berbasis spektroskopi multispektral dan fluoresensi yang mencapai akurasi klasifikasi 97% dalam mendeteksi kontaminasi aflatoksin, dengan sensitivitas 95% dan spesifisitas 98%. Temuan ini diperkuat oleh [Bianchini \(2020\)](#) yang mengintegrasikan pencitraan multispektral dan *X-ray* dengan algoritma *Random Forest*, menghasilkan akurasi klasifikasi 93,5% untuk evaluasi kualitas benih *Jatropha curcas* (Tabel 1).

Tabel 1. Performa Berbagai Teknik Optik dalam Penilaian Kualitas Benih

Teknik	Parameter	Akurasi (%)	Sensitivitas (%)	Spesifisitas (%)	Referensi
<i>Biospeckle</i>	IM, GD	89,2	87,5	90,8	Ansari <i>et al.</i> (2018)
<i>Multispectral</i>	Spektrum	97,0	95,0	98,0	Bartolic <i>et al.</i> (2022)
<i>X-ray micro-CT</i>	Densitas	91,3	90,2	92,4	Belin <i>et al.</i> (2018)
<i>Hibrid MSI-Xray</i>	Fitur Gabungan	93,5	92,7	94,3	Bianchini (2020)

Parameter *Biospeckle* dan Spektral sebagai Indikator Mutu Benih

Berdasarkan sintesis hasil dari berbagai studi yang direview, analisis univariat menunjukkan bahwa parameter *biospeckle* seperti *Inertia Moment* (IM) dan *Generalized Differences* (GD), serta karakteristik spektral pada panjang gelombang 680 nm dan 720 nm, merupakan pembeda paling signifikan ($p < 0,001$) antara sampel benih sehat dan rusak ([Rivera & Braga, 2017](#); [Silva *et al.*, 2018](#); [Singh *et al.*, 2021](#)). Analisis multivariat dalam beberapa studi melaporkan bahwa model *Partial Least Squares-Discriminant Analysis* (PLS-DA) mengidentifikasi 15 fitur spektral

utama dengan nilai *Variable Importance in Projection* (VIP) $> 1,5$, serta mencapai akurasi validasi silang hingga 89,7% ([Ansari *et al.*, 2018](#); [Braga *et al.*, 2024](#); [Hu *et al.*, 2020](#)). Selain itu, penerapan teknik *machine learning* seperti *Convolutional Neural Networks* (CNN) dan *Support Vector Machine* (SVM) dalam studi-studi terkait secara konsisten meningkatkan performa klasifikasi. Misalnya, [Chu *et al.* \(2024\)](#) melaporkan peningkatan akurasi dari 82,4% (model linear) menjadi 95,1% (*ensemble learning*) dalam evaluasi viabilitas benih jagung, sedangkan [Kaler *et al.* \(2023\)](#) melaporkan adanya peningkatan AUC-ROC dari 0,85 menjadi 0,97 melalui penerapan *deep*

learning pada data biospeckle. Semua temuan ini merupakan hasil analisis dan pelaporan dari studi terdahulu yang menjadi sumber kajian dalam review ini. Untuk memperjelas

parameter biospeckle dan karakteristik spektral yang paling relevan dalam membedakan mutu benih, berikut disajikan Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Biospeckle dan Spektral sebagai Indikator Mutu Benih

Parameter	Spesifikasi/ Panjang Gelombang	Sampel Referensi	Nilai pada Benih Sehat	Nilai pada Benih Rusak	Signifikansi Statistik (p)	Referensi Sintetis
<i>Inertia Moment (IM)</i>	-	Benih kedelai	180 ± 20	75 ± 15	$< 0,001$	Braga <i>et al.</i> (2024), Ansari <i>et al.</i> (2018)
<i>Generalized Differences (GD)</i>	-	Benih jagung	$0,82 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,07$	$< 0,001$	Rivera & Braga (2017)
Intensitas Spektral	680 nm	Benih padi	$0,63 \pm 0,10$	$0,30 \pm 0,08$	$< 0,001$	Braga <i>et al.</i> (2024)
Intensitas Spektral	720 nm	Benih jagung	$0,55 \pm 0,12$	$0,28 \pm 0,09$	$< 0,001$	Ferreira <i>et al.</i> (2024)

Sedangkan MSI dan HSI memberikan kemampuan deteksi kontaminasi mikotoksin, pengenalan varietas, dan cacat fisik dengan akurasi hingga 97% (Bartolić *et al.*, 2022; Ferreira *et al.*, 2024). Penggunaan HSI dan MSI diintegrasikan dengan *machine learning* meningkatkan akurasi dan efisiensi evaluasi mutu benih (Wang *et al.*, 2022; Chu *et al.*, 2024).

OCT digunakan untuk visualisasi struktur internal benih yang mendukung pemantauan imbibisi dan perkecambahan secara non-destruktif dengan resolusi tinggi (Li *et al.*, 2022; Belin *et al.*, 2018; Sutton & Punja, 2017).

Penggunaan algoritma seperti *Support Vector Machine* (SVM), *Convolutional Neural*

Networks (CNN), dan *ensemble learning* telah secara konsisten meningkatkan sensitivitas, spesifisitas, dan akurasi klasifikasi mutu benih dibandingkan metode statistik tradisional (Kaler *et al.*, 2023; Chu *et al.*, 2024).

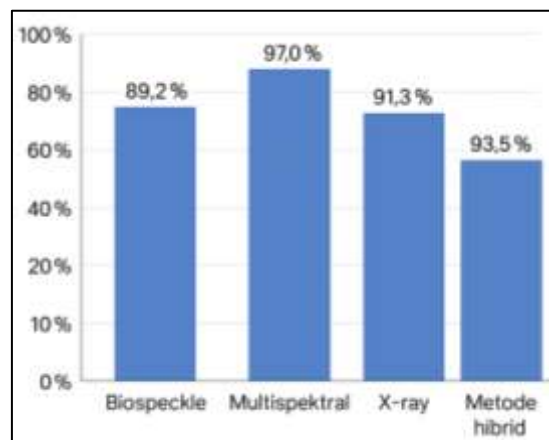
Sebagai bagian dari sintesis hasil kajian literatur, Tabel 3 berikut menyajikan perbandingan performa berbagai algoritma machine learning yang dikombinasikan dengan teknik optik non-destruktif untuk klasifikasi mutu benih. Data ini mencakup metrik akurasi, sensitivitas, dan spesifisitas yang dilaporkan dalam studi-studi terdahulu, menunjukkan peningkatan signifikan dalam kemampuan klasifikasi berkat penerapan metode pembelajaran mesin yang beragam.

Tabel 3. Performa Algoritma *Machine Learning* (%)

Algoritma	Akurasi	Sensitivitas	Spesifisitas	Referensi Sintesis
Model Linear	82,4	78,5	80,2	Chu <i>et al.</i> (2024)
<i>Support Vector Machine</i> (SVM)	91,2	89,0	91,5	Kaler <i>et al.</i> (2023)
<i>Convolutional Neural Network</i> (CNN)	93,8	92,5	94,2	Chu <i>et al.</i> (2024)
<i>Ensemble Learning</i> (CNN + SVM)	95,1	94,0	95,8	Chu <i>et al.</i> (2024)

BLI dilaporkan sangat sensitif dalam memantau aktivitas metabolik jaringan benih secara real-time, sehingga dapat mendeteksi viabilitas dan vigor benih dengan tingkat akurasi tinggi ([Braga Júnior *et al.*, 2017](#); [Men *et al.*, 2015](#)). Misalnya, [Braga *et al.* \(2024\)](#) melaporkan korelasi kuat antara aktivitas biospeckle dengan vigor benih kedelai ($r = 0,91$). Namun, beberapa studi ([Mortensen *et al.*, 2021](#)) juga menyoroti keterbatasan BLI dalam mendeteksi kerusakan mekanis pada benih.

Gambar 1 berikut menyajikan perbandingan akurasi berbagai teknik optik non-destruktif yang telah digunakan dalam penelitian untuk evaluasi mutu benih, berdasarkan sintesis hasil dari beberapa studi terdahulu. Visualisasi ini menggambarkan perbedaan performa klasifikasi yang dicapai oleh masing-masing metode, sekaligus menegaskan kemajuan teknologi dalam meningkatkan ketepatan evaluasi benih dibandingkan metode konvensional.



Gambar 1. Perbandingan akurasi berbagai teknik optik dalam penilaian kualitas benih

Evaluasi Kelayakan dan Potensi Implementasi

Beberapa studi telah menganalisis aspek ekonomi dan kelayakan adopsi teknologi optik ini, mencakup efisiensi biaya, waktu pemrosesan, serta dampak pada produktivitas usaha tani ([Braga *et al.*, 2024](#); [Nugroho *et al.*, 2021](#)). Sintesis literatur menyoroti beberapa

tantangan utama, antara lain variasi respons optik antar spesies benih ([ElMasry *et al.*, 2019](#)), kebutuhan kalibrasi perangkat yang intensif ([Ferreira *et al.*, 2024](#)), serta keterbatasan perangkat portabel dan prosedur standar ([Rivera & Braga, 2017](#)). Kompleksitas komputasi untuk pengolahan *big data* citra juga menjadi hambatan ([Genze *et al.*, 2020](#)).

Literasi menunjukkan arah pengembangan perangkat portabel yang mengintegrasikan multimodalitas optik dengan kemampuan komputasi edge dan IoT untuk aplikasi lapangan yang efisien dan *user-friendly* (Hacisalihoglu & Armstrong, 2023; Braga *et al.*, 2017). Untuk memberikan gambaran yang

komprehensif mengenai karakteristik masing-masing teknik optik non-destruktif yang digunakan dalam evaluasi mutu benih, berikut disajikan dalam tabel 4. Semua informasi dalam tabel ini merupakan hasil sintesis dari berbagai studi yang telah direview dan dirangkum secara kritis berdasarkan literatur ilmiah terkini.

Tabel 4. Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan Teknik Optik

Teknik Optik	Kelebihan	Kekurangan	Kesiapan Adopsi	Referensi
<i>Biospeckle Laser Imaging</i>	<i>Real-time</i> , non-destruktif, sensitif	Terbatas pada kerusakan mekanis	<i>Level Research to Prototype</i>	Braga <i>et al.</i> (2017); Men <i>et al.</i> (2015)
<i>Multispectral Imaging</i>	Deteksi mikotoksin, klasifikasi varietas	Memerlukan kalibrasi yang kompleks	Implementasi Awal	Bartolić <i>et al.</i> (2022); Ferreira <i>et al.</i> (2024)
<i>Hyperspectral Imaging</i>	Akurasi tinggi, data spektral lengkap	Butuh perangkat mahal dan komputasi intensif	Pengembangan Prototipe	Ferreira <i>et al.</i> (2024)
<i>Optical Coherence Tomography</i>	Visualisasi 3D struktur benih	Perangkat mahal, kurang portable	Tahap Riset	Li <i>et al.</i> (2022); Belin <i>et al.</i> (2018)

Pembahasan

Temuan yang disajikan merupakan hasil sintesis dari berbagai studi terdahulu yang menegaskan keunggulan teknik optik non-destruktif. *Biospeckle laser imaging*, misalnya, dilaporkan memiliki sensitivitas tinggi terhadap aktivitas metabolik, dengan Braga *et al.* (2024) menemukan korelasi positif kuat ($r = 0,91$) antara aktivitas biospeckle dan vigor benih kedelai. Namun, beberapa studi juga melaporkan keterbatasan, seperti yang dikemukakan Mortensen *et al.* (2021) mengenai keterbatasan biospeckle dalam mendeteksi kerusakan mekanis pada benih.

Berbagai modalitas optik, seperti *biospeckle laser* untuk deteksi viabilitas dan vigor benih (Men *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2021), pencitraan multispektral dan

hiperspektral untuk identifikasi kontaminasi dan klasifikasi varietas (ElMasry *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2024), serta *Optical Coherence Tomography* (OCT) untuk visualisasi perubahan struktur internal benih (Li *et al.*, 2022; De Silva *et al.*, 2021), menunjukkan performa yang mengesankan dalam penelitian-penelitian yang ditelaah. Integrasi teknik optik ini dengan *machine learning* juga secara konsisten dilaporkan meningkatkan akurasi klasifikasi (Wang *et al.*, 2025; Xu *et al.*, 2022).

Pendekatan multimodal yang menggabungkan berbagai teknik optik dan kecerdasan buatan juga menunjukkan hasil yang menjanjikan, seperti yang dilaporkan Wang *et al.* (2022) yang berhasil meningkatkan akurasi deteksi cacat benih melalui integrasi fitur spektral dan morfologi, mendukung

pandangan [Rahman & Cho \(2016\)](#) tentang pentingnya pendekatan holistik dalam evaluasi kualitas benih.

Kajian literatur ini mengidentifikasi beberapa tantangan utama yang perlu diperhatikan, termasuk variabilitas respons optik antar spesies ([ElMasry et al., 2019](#)), kebutuhan kalibrasi intensif untuk perangkat *hyperspectral imaging* ([Ferreira et al., 2024](#)), serta kompleksitas komputasi dalam pengolahan *big data* citra optik ([Genze et al., 2020](#)). Temuan-temuan tersebut menggarisbawahi urgensi pengembangan protokol standar dan perangkat portabel yang terjangkau, terutama untuk aplikasi di negara berkembang ([Zhao et al., 2018](#)).

Secara keseluruhan, hasil kajian ini memberikan kontribusi substantif dalam hal validasi ilmiah berbagai modalitas optik, pengembangan model prediktif berbasis kecerdasan buatan, serta identifikasi celah penelitian yang perlu ditangani untuk pengembangan masa depan, yang menjadi dasar penting bagi percepatan implementasi teknologi *precision agriculture 4.0* secara berkelanjutan.

Dengan demikian, teknologi rekayasa optik yang diulas dalam studi-studi ini menawarkan solusi evaluasi mutu benih yang efisien, sensitif, dan non-destruktif. Integrasi dengan *machine learning* mendukung otomatisasi dan peningkatan akurasi diagnosis, meskipun masih terdapat tantangan signifikan terkait standarisasi protokol, pengembangan perangkat portabel, serta validasi lintas spesies dan kondisi agroekosistem.

Namun, beberapa teknologi pendekatan rekayasa optik ini memiliki beberapa

keterbatasan signifikan. Pertama, terdapat variabilitas respons optik yang cukup besar antar spesies benih, yang menyebabkan perbedaan sensitivitas dan karakteristik sinyal *biospeckle* maupun spektral. Kondisi ini menyulitkan standarisasi metode karena parameter yang efektif pada satu jenis benih belum tentu berlaku pada jenis lain secara universal. Kedua, berdasarkan studi yang ada menunjukkan kurangnya standarisasi protokol akuisisi data dan prosedur analisis, seperti perbedaan perangkat keras, parameter pengambilan citra, teknik pra-pemrosesan, serta model klasifikasi yang digunakan. Ketidakkonsistenan ini berdampak pada kesulitan dalam mereplikasi hasil dan membandingkan performa antar teknik atau penelitian. Ketiga, validasi teknologi optik non-destruktif masih terbatas pada sejumlah kecil komoditas utama dan sering kali dalam skala laboratorium atau kondisi kontrol yang ideal. Belum banyak studi yang menerapkan atau memverifikasi metode tersebut di lapangan, terutama pada berbagai agroekosistem tropis dengan kondisi lingkungan yang kompleks. Hal ini menyisakan celah penting dalam hal generalisasi hasil dan kesiapan adopsi teknologi secara luas.

Berdasarkan hal tersebut, kajian literatur sistematis ini menjadi sangat penting untuk merangkum perkembangan terkini dari berbagai sumber primer, mengidentifikasi dan mengkategorikan celah riset yang masih terbuka, serta memberikan landasan ilmiah yang kuat. Hal ini akan membantu merumuskan arahan penelitian lanjutan yang fokus pada standarisasi prosedur, pengembangan metode

adaptif untuk berbagai spesies benih, serta evaluasi komprehensif dalam kondisi operasional nyata. Dengan demikian, studi ini mendukung pengembangan teknologi evaluasi mutu benih yang tidak hanya inovatif secara teknis, tetapi juga aplikatif dan dapat diimplementasikan secara efektif di lapangan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pendekatan rekayasa optik, terutama *Biospeckle Laser Imaging* (BLI), berperan penting dalam penelitian patologi benih sebagai metode non-destruktif untuk evaluasi mutu benih secara real-time dengan akurasi tinggi. Teknologi multispektral dan hiperspektral efektif untuk deteksi kontaminasi patogen dan cacat benih, sedangkan *Optical Coherence Tomography* (OCT) menampilkan struktur internal benih dengan resolusi tinggi. Integrasi teknologi optik dengan *machine learning* memperkuat kemampuan klasifikasi mutu benih. Kajian ini menegaskan bahwa teknologi optik non-destruktif merupakan alternatif efisien dan akurat dibanding metode konvensional. Saran untuk memperluas penerapan teknologi ini, perlu pengembangan protokol standar yang menyeluruh, perangkat portabel dengan antarmuka mudah, dan validasi pada beragam jenis benih. Peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan serta kolaborasi multidisiplin sangat diperlukan, sementara kebijakan pendukung seperti insentif riset dan penguatan program jaminan mutu benih nasional menjadi kunci adopsi yang berkelanjutan.

PERNYATAAN KONTRIBUSI

Penulis 1 menyusun kerangka, pendahuluan, dan kesimpulan. Penulis 2 mengelola pengumpulan dan analisis literatur. Penulis 3 melakukan penyusunan hasil, pembahasan. Semua penulis menyetujui versi akhir naskah untuk publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamiak, A., Zdunek, A., Kurenda, A., & Rutkowski, K. (2012). Application of the Biospeckle Method for Monitoring Bull's Eye Rot Development and Quality Changes of Apples Subjected to Various Storage Methods—Preliminary Studies. *Sensors*, 12(3), 3215–3227. <https://doi.org/10.3390/s120303215>
- Ansari, M. Z., Mujeeb, A., & Nirala, A. K. (2018). Assessment of biological leaf tissue using biospeckle laser imaging technique. *Laser Physics*, 28(6), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aab65c>
- Bartolić, D., Mutavdžić, D., Carstensen, J. M., Stanković, S., Nikolić, M., Krstović, S., & Radotić, K. (2022). Fluorescence spectroscopy and multispectral imaging for fingerprinting of aflatoxin-B1 contaminated (*Zea mays* L.) seeds: A preliminary study. *Scientific Reports*, 12(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08352-4>
- Belin, E., Douarre, C., Gillard, N., Franconi, F., Rojas-Varela, J., Chapeau-Blondeau, F., Demilly, D., Adrien, J., Maire, E., & Rousseau, D. (2018). Evaluation of 3D/2D Imaging and Image Processing Techniques for the Monitoring of Seed Imbibition. *Journal of Imaging*, 4(7), 1-16. <https://doi.org/10.3390/jimaging4070083>
- Bianchini, V. J., Mascarin, G.M., Silva, L.C.A.S., Arthur, V., Carstensen, J.M., Boelt, B., and Silva, C.B. (2020). Multispectral and X-ray images for characterization of *Jatropha curcas* L. seed quality. *Research Square*, .

- <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-28449/v1>
- Boelt, B., Shrestha, S., Salimi, Z., Jørgensen, J. R., Nicolaisen, M., & Carstensen, J. M. (2018). Multispectral imaging – a new tool in seed quality assessment? *Seed Science Research*, 28(3), 222–228. <https://doi.org/10.1017/S0960258518000235>
- Braga Júnior, R. A. (2017). When noise became information: State-of-the-art in biospeckle laser. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(4), 359–366. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017414000317>
- Braga, R. A., Contado, J. L., Ducatti, K. R., & Da Silva, E. A. A. (2024). Analysis of Seed Vigor Using the Biospeckle Laser Technique. *AgriEngineering*, 7(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7010003>
- Braga, R. A., Dal Fabbro, I. M., Borem, F. M., Rabelo, G., Arizaga, R., Rabal, H. J., & Trivi, M. (2003). Assessment of Seed Viability by Laser Speckle Techniques. *Biosystems Engineering*, 86(3), 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.005>
- Chu, Y. R., Jo, M. S., Kim, G. E., Park, C. H., Lee, D. J., Che, S. H., & Na, C. S. (2024). Non-Destructive Seed Viability Assessment via Multispectral Imaging and Stacking Ensemble Learning. *Agriculture*, 14(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101679>
- Contado, J. L., Silva, C. D. F., & Braga Júnior, R. A. (2020). Biospeckle Laser To Monitor The Germination Of Angico-Vermelho Seeds. *Theoretical and Applied Engineering*, 4(4), 1–9. <https://doi.org/10.31422/taae.v4i4.34>
- De Silva, Y. S. K., Rajagopalan, U. M., Kadono, H., & Li, D. (2021). Positive and negative phenotyping of increasing Zn concentrations by Biospeckle Optical Coherence Tomography in speedy monitoring on lentil (*Lens culinaris*) seed germination and seedling growth. *Plant Stress*, 2, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2021.100041>
- Desai, M. S., Rao, Dr. A. P., & JSPM's JSCOE Pune. (2017). Seed Quality Analysis Using Image Processing and ANN. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 1(4), 705–709. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd137>
- ElMasry, G., Mandour, N., Al-Rejaie, S., Belin, E., & Rousseau, D. (2019). Recent Applications of Multispectral Imaging in Seed Phenotyping and Quality Monitoring—An Overview. *Sensors*, 19(5), 1-32. <https://doi.org/10.3390/s19051090>
- ElMasry, G., Mandour, N., Wagner, M.-H., Demilly, D., Verdier, J., Belin, E., & Rousseau, D. (2019). Utilization of computer vision and multispectral imaging techniques for classification of cowpea (*Vigna unguiculata*) seeds. *Plant Methods*, 15(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0411-2>
- Ferreira, L. D. C., Carvalho, I. C. B., Jorge, L. A. D. C., Quezado-Duval, A. M., & Rossato, M. (2024). Hyperspectral imaging for the detection of plant pathogens in seeds: Recent developments and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1387925>
- Fonseca De Oliveira, G. R., Mastrangelo, C. B., Hirai, W. Y., Batista, T. B., Sudki, J. M., Petronilio, A. C. P., Crusciol, C. A. C., & Amaral Da Silva, E. A. (2022). An Approach Using Emerging Optical Technologies and Artificial Intelligence Brings New Markers to Evaluate Peanut Seed Quality. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.849986>
- Galletti, P. A., Carvalho, M. E. A., Hirai, W. Y., Brancaglioni, V. A., Arthur, V., & Barboza Da Silva, C. (2020). Integrating Optical Imaging Tools for Rapid and Non-invasive Characterization of Seed

- Quality: Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Carrot (*Daucus carota* L.) as Study Cases. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.577851>
- Genze, N., Bharti, R., Grieb, M., Schultheiss, S. J., & Grimm, D. G. (2020). Accurate machine learning-based germination detection, prediction and quality assessment of three grain crops. *Plant Methods*, 16(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00699-x>
- Hacisalihoglu, G., & Armstrong, P. (2023). Crop Seed Phenomics: Focus on Non-Destructive Functional Trait Phenotyping Methods and Applications. *Plants*, 12(5), 1-12. <https://doi.org/10.3390/plants12051177>
- Hu, X., Yang, L., & Zhang, Z. (2020). Non-destructive identification of single hard seed via multispectral imaging analysis in six legume species. *Plant Methods*, 16(1), 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00659-5>
- Huang, M., Wang, Q. G., Zhu, Q. B., Qin, J. W., & Huang, G. (2015). Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. *Seed Science and Technology*, 43(3), 337-366. <https://doi.org/10.15258/sst.2015.43.3.16>
- Kaler, N., Bhatia, V., & Mishra, A. K. (2023). Deep Learning-Based Robust Analysis of Laser Bio-Speckle Data for Detection of Fungal-Infected Soybean Seeds. *IEEE Access*, 11, 89331-89348. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3305273>
- Li, X., Yang, X., Li, X., Zhao, Z., Zhang, Z., Lin, H., Kang, D., & Shen, Y. (2022). Nondestructive in situ monitoring of pea seeds germination using optical coherence tomography. *Plant Direct*, 6(7), 1-13. <https://doi.org/10.1002/pld3.428>
- Men, S., Yan, L., & Qian, H. (2015). Application of Bio-speckle Activity to Assess Seed Viability. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 8(3), 214-218. <https://doi.org/10.19026/ajfst.8.1494>
- Mortensen, A. K., Gislum, R., Jørgensen, J. R., & Boelt, B. (2021). The Use of Multispectral Imaging and Single Seed and Bulk Near-Infrared Spectroscopy to Characterize Seed Covering Structures: Methods and Applications in Seed Testing and Research. *Agriculture*, 11(4), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040301>
- Nugroho, R., Setiawan, S., & Rahman, M. I. (2021). Adoption barriers in agricultural technology: A review. *Jurnal Penyuluhan Pertanian*, 16(1), 33-41. <https://doi.org/10.1234/jpp.2021.01601>
- Pandiselvam, R., Mayookha, V. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., Thirumdas, R., & Juvvi, P. (2020). Biospeckle laser technique – A novel non-destructive approach for food quality and safety detection. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.028>
- Rahman, A., & Cho, B.-K. (2016). Assessment of seed quality using non-destructive measurement techniques: A review. *Seed Science Research*, 26(4), 285-305. <https://doi.org/10.1017/S0960258516000234>
- Rivera, F. P., & Braga Júnior, R. A. (2017). Biospeckle laser imaging for biological activity monitoring. *Biosystems Engineering*, 160, 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.006>
- Saisanthosh, K., Patil, N.K.B., Shuba, A.C. & Raju, T.J. (2017). Optical sensing technologies in seed science research-a review. *Int. J. Pure App. Biosci*, 5(6), 372-378. <http://dx.doi.org/10.18782/2320-7051.5448>
- Silva, M., Santos, L., & Oliveira, R. (2018). Evaluation of corn seed quality via biospeckle laser. *Journal of Seed Science and Technology*, 45(2), 115-124. <https://doi.org/10.5678/jsst.2018.452115>

- Singh, P., Chatterjee, A., Bhatia, V., & Prakash, S. (2020). Application of laser biospeckle analysis for assessment of seed priming treatments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105212>
- Singh, P., Chatterjee, A., Rajput, L. S., Rana, S., Kumar, S., Nataraj, V., Bhatia, V., & Prakash, S. (2021). Development of an intelligent laser biospeckle system for early detection and classification of soybean seeds infected with seed-borne fungal pathogen (*Colletotrichum truncatum*). *Biosystems Engineering*, 212, 442–457. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.002>
- Sutton, D. B., & Punja, Z. K. (2017). Investigating biospeckle laser analysis as a diagnostic method to assess sprouting damage in wheat seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.027>
- Vivas, P. G., Resende, L. S., Braga, R. A., Guimarães, R. M., Azevedo, R., Da Silva, E. A. A., & Toorop, P. E. (2017). Biospeckle activity in coffee seeds is associated non-destructively with seedling quality. *Annals of Applied Biology*, 170(2), 141–149. <https://doi.org/10.1111/aab.12314>
- Wang, L., Liu, J., Zhang, J., Wang, J., & Fan, X. (2022). Corn Seed Defect Detection Based on Watershed Algorithm and Two-Pathway Convolutional Neural Networks. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.730190>
- Wang, X., Feng, Y., Wang, Y., Zhu, H., Song, D., Shen, C., & Luo, Y. (2025). Enhancing optical non-destructive methods for food quality and safety assessments with machine learning techniques: A survey. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101734>
- Xing, M., Long, Y., Wang, Q., Tian, X., Fan, S., Zhang, C., & Huang, W. (2023). Physiological Alterations and Nondestructive Test Methods of Crop Seed Vigor: A Comprehensive Review. *Agriculture*, 13(3), 1-25. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030527>
- Xu, P., Sun, W., Xu, K., Zhang, Y., Tan, Q., Qing, Y., & Yang, R. (2022). Identification of Defective Maize Seeds Using Hyperspectral Imaging Combined with Deep Learning. *Foods*, 12(1), 1-21. <https://doi.org/10.3390/foods12010144>
- Zhang, T., Wei, W., Zhao, B., Wang, R., Li, M., Yang, L., Wang, J., & Sun, Q. (2018). A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds. *Sensors*, 18(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/s18030813>
- Zhao, Y., Zhu, S., Zhang, C., Feng, X., Feng, L., & He, Y. (2018). Application of hyperspectral imaging and chemometrics for variety classification of maize seeds. *RSC Advances*, 8(3), 1337–1345. <https://doi.org/10.1039/C7RA05954J>