UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Sistem Fotoakustik Berbasis Serat Optik untuk Pencitraan Sampel Biologis
Putut Giri Tulus Widodo, Prof. Dr. Mitrayana, S.Si., M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Sistem Fotoakustik Berbasis Serat Optik untuk Pencitraan Sampel Biologis

Oleh

Putut Giri Tulus Widodo
24/546928/PPA/06862

Telah dilakukan penelitian pengembangan sistem pencitraan fotoakustik berbasis serat optik (FASO) berdasaran sistem fotoakustik dasar (FAD) sebagai pendekatan untuk meningkatkan portabilitas sistem sekaligus mengevaluasi pengaruh propagasi serat optik *multimode* terhadap pembentukan distribusi intensitas citra fotoakustik. Sistem FASO yang dibangun terdiri dari serat optik *multimode* sebagai pandu gelombang optik dan laser dioda 532 nm, mikrofon *condenser* sebagai detektor akustik, serta mekanisme pemindaian dua dimensi. Pengujian dilakukan menggunakan sampel fantom homogen dan sampel biologis berupa daging dengan variasi perlakuan perendaman minyak. Evaluasi kelayakan sistem FASO dilakukan melalui karakterisasi daya laser, respons akustik, lalu evaluasi statistik citra hasil pengujian sistem, kesesuaian struktur citra dengan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM), serta analisis tekstur menggunakan entropi GLCM berbasis *Region of Interest* (ROI). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa sistem FASO mampu mempertahankan daya rata-rata yang sebanding dengan sistem dasar, yaitu sebesar $74{,}37$ mW dibandingkan $75{,}08$ mW, dengan kestabilan yang lebih baik yang ditunjukkan oleh penurunan simpangan baku daya dari $3{,}84$ mW menjadi $0{,}76$ mW serta fluktuasi RMS dari $5{,}12\%$ menjadi $1{,}02\%$. Respons akustik yang dihasilkan juga tetap dapat dipertahankan sehingga sistem serat optik mampu digunakan sebagai konfigurasi propagasi optik dalam sistem fotoakustik yang dikembangkan. Pada pengujian fantom homogen, sistem FASO menghasilkan struktur citra yang tetap serupa dengan sistem dasar FAD dengan nilai SSIM tinggi ($0{,}88$–$0{,}90$), namun menunjukkan pola granular lokal yang lebih dominan. Analisis statistik dasar citra menunjukkan bahwa rata-rata intensitas, CNR, dan SNR kedua sistem relatif sebanding, sehingga perbedaan karakter citra tidak dapat dijelaskan secara langsung melalui parameter statistik global tersebut. Analisis tekstur menggunakan entropi GLCM berbasis ROI menunjukkan perbedaan yang lebih jelas, dengan nilai entropi pada citra FAD berada pada rentang $7{,}83$–$8{,}19$, sedangkan pada citra FASO meningkat menjadi $8{,}78$–$9{,}15$. Peningkatan kompleksitas tekstur tersebut menunjukkan bahwa sistem berbasis serat optik menghasilkan heterogenitas distribusi intensitas lokal yang lebih tinggi dibandingkan sistem dasar. Perbedaan karakter citra antara sistem FAD dan FASO dijelaskan melalui

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Sistem Fotoakustik Berbasis Serat Optik untuk Pencitraan Sampel Biologis
Putut Giri Tulus Widodo, Prof. Dr. Mitrayana, S.Si., M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

fenomena interferensi *multimode* pada serat optik. Superposisi antar mode terpandu menghasilkan interferensi mode yang memodifikasi distribusi (*optical fluence*). *Optical fluence* yang termodifikasi tersebut selanjutnya memodifikasi distribusi tekanan awal fotoakustik dan amplitudo akustik terukur pada setiap titik pemindaian, sehingga terbentuk pola granular lokal pada citra hasil rekonstruksi. Pada pengujian sampel biologis, nilai entropi GLCM berbasis ROI meningkat secara sistematis dari sampel kontrol, sampel dengan perlakuan minyak kelapa, minyak wijen, minyak jelantah, tertinggi pada sampel minyak babi. Peningkatan tersebut menunjukkan bertambahnya heterogenitas optik jaringan akibat perubahan distribusi koefisien serapan dan hamburan pada jaringan biologis. Dalam sistem berbasis serat optik, heterogenitas distribusi *fluence* akibat interferensi *multimode* meningkatkan sensitivitas sistem terhadap variasi mikrostruktur jaringan, sehingga granularitas citra tidak hanya merepresentasikan karakteristik sistem, tetapi juga memuat informasi diagnostik terkait kondisi biologis sampel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi serat optik *multimode* tidak hanya meningkatkan stabilitas dan portabilitas sistem fotoakustik, tetapi juga memodifikasi distribusi *optical fluence* yang berperan dalam pembentukan sinyal fotoakustik, sehingga memperkaya karakter tekstur citra dan meningkatkan sensitivitas analisis terhadap perubahan struktur biologis.

Kata-kata kunci : pencitraan fotoakustik, serat optik, serat optik *multimode*, respons akustik, *optical fluence*.

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Sistem Fotoakustik Berbasis Serat Optik untuk Pencitraan Sampel Biologis
Putut Giri Tulus Widodo, Prof. Dr. Mitrayana, S.Si., M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

Fiber-Optic-Based Photoacoustic Imaging System for Biological Samples

By

Putut Giri Tulus Widodo
24/546928/PPA/06862

This study developed an optical fiber-based photoacoustic imaging system as an approach to improve system portability while evaluating the influence of multimode optical propagation on the formation of photoacoustic image intensity distributions. The developed system consisted of a 532 nm diode laser, a multimode optical fiber serving as the optical waveguide, a condenser microphone as the acoustic detector, and a two-dimensional scanning mechanism. Experiments were conducted using homogeneous phantom samples and biological meat samples subjected to various oil immersion treatments. System evaluation included laser power characterization, acoustic response analysis, image structural similarity assessment (SSIM), contrast-to-noise ratio (CNR), and texture analysis using region of interest (ROI)-based GLCM entropy. The characterization results demonstrated that the optical fiber-based system was able to maintain an average optical power comparable to the conventional direct laser system, namely 74.37 mW compared to 75.08 mW, while exhibiting improved stability indicated by the reduction of power standard deviation from 3.84 mW to 0.76 mW and RMS fluctuation from 5.12% to 1.02%. The generated acoustic response was also successfully preserved, indicating that the optical fiber configuration can be effectively utilized as an optical propagation configuration in the developed photoacoustic imaging system. In homogeneous phantom imaging, the FASO system preserved object structures comparable to the conventional FAD system with high SSIM values (0.88–0.90), while exhibiting more dominant local granular patterns. Basic image statistical analysis showed that the mean intensity, CNR, and SNR of both systems were relatively comparable, indicating that the observed differences in image characteristics could not be directly explained through global statistical parameters alone. ROI-based GLCM entropy analysis revealed a clearer distinction, where entropy values in FAD images ranged from 7.83 to 8.19, whereas FASO images increased to 8.78–9.15. This increase in texture complexity indicates that the optical fiber-based system produces higher local intensity heterogeneity compared to the conventional system. The difference in image characteristics between the FAD and FASO systems is explained by the multimode interference phenomenon within the optical fiber. Coherent superposition among guided modes generates modal in-

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Sistem Fotoakustik Berbasis Serat Optik untuk Pencitraan Sampel Biologis
Putut Giri Tulus Widodo, Prof. Dr. Mitrayana, S.Si., M.Si.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

terference that modulates the optical fluence distribution spatially. The modulated optical fluence subsequently alters the initial photoacoustic pressure distribution and the measured acoustic amplitude at each scanning point, resulting in the formation of local granular patterns in the reconstructed images. In biological sample imaging, ROI-based GLCM entropy values increased systematically from approximately 7.86 in the control sample to approximately 8.05 for coconut oil treatment, 8.33 for sesame oil treatment, 8.89 for waste cooking oil treatment, and reached approximately 8.96 for pork oil treatment. This increase indicates enhanced optical heterogeneity within the tissue caused by variations in optical absorption and scattering distributions. In the optical fiber-based system, fluence heterogeneity induced by multimode interference enhanced the system sensitivity toward tissue microstructural variations, such that the observed image granularity not only represented system characteristics but also contained diagnostic information associated with the biological condition of the sample. The results demonstrate that the integration of multimode optical fibers not only improves the stability and portability of the photoacoustic imaging system, but also modifies the optical fluence distribution involved in photoacoustic signal formation, thereby enriching image texture characteristics and enhancing sensitivity toward biological structural variations.

Keywords : photoacoustic, optical fiber, multimode optical fiber, acoustic response, optical fluence.