

Peningkatan Stabilitas Citra *Laser Speckle Imaging* Portabel Non-Destruktif melalui Reduksi *Noise* Berbasis *Silicon rubber*

Hendra Pratama^{(1,a)*}, Neneng Fitrya^(1,b), Santika Anggraini Bakri^(1,c) dan Shabri Putra Wirman^(1,d)

⁽¹⁾Program Studi Fisika, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam dan Kesehatan, Universitas Muhammadiyah Riau, Jl. Tuanku Tambusai, Delima, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau, Indonesia, 28292

Email : ^(a)nenengfitrya@umri.ac.id, ^(b)nenengfitrya@umri.ac.id, ^(c)shabri.pw@umri.ac.id,

^(d)santikaanggraini468@gmail.com

Diterima (28 Agustus 2025), Direvisi (17 November 2025)

Abstract. *Laser Speckle Imaging (LSI) is a non-destructive imaging technique capable of capturing surface microstructure variations thru the speckle patterns formed by the scattering of coherent light. This method is widely applied in medical, materials, and food fields due to its fast, portable, and non-destructive characteristics. The main challenge in implementing LSI lies in the stability of the speckle pattern, which is highly sensitive to noise from both mechanical vibrations and environmental fluctuations. Pattern stability plays an important role in maintaining the accuracy of data interpretation, making effective damping strategies necessary. This research focuses on evaluating the thickness of silicon rubber as a damping layer to improve speckle image stability. The tested thickness variations included 0 mm, 1 mm, 2 mm, and 3 mm. The main parameters, namely speckle contrast, average intensity, and standard deviation, were calculated, and the results were then analyzed using Principal Component Analysis (PCA) to determine the optimal thickness. The results show that a thickness of 2 mm produces the best image stability under both undisturbed and disturbed conditions. The speckle pattern at this thickness exhibits consistent contrast distribution and tight PCA clusters, indicating that noise can be effectively suppressed without losing microstructural detail. A thickness of 0 mm is unable to dampen fluctuations, while 3 mm reduces contrast due to excessive damping. This finding proves that 2 mm silicon rubber is capable of increasing the signal-to-noise ratio while maintaining the quality of the speckle image. This simple strategy has the potential to enhance the reliability of LSI as a non-destructive imaging method that is fast, portable, and applicable to a wide range of application areas.*

Keywords: *Laser Speckle Imaging, Noise, Principal Component Analysis, Silicon rubber*

Abstrak. *Laser Speckle Imaging (LSI) merupakan teknik pencitraan non-destruktif yang mampu menangkap variasi mikrostruktur permukaan melalui pola spekel yang terbentuk akibat hamburan cahaya koheren. Metode ini banyak diaplikasikan dalam bidang medis, material, hingga pangan karena karakteristiknya yang cepat, portabel, dan tidak merusak sampel. Tantangan utama pada penerapan LSI terletak pada kestabilan pola spekel yang sangat sensitif terhadap noise, baik yang berasal dari getaran mekanik maupun fluktuasi lingkungan. Kestabilan pola berperan penting dalam menjaga akurasi interpretasi data, sehingga diperlukan strategi peredaman yang efektif. Penelitian ini difokuskan pada evaluasi ketebalan *silicon rubber* sebagai lapisan peredam untuk meningkatkan stabilitas citra spekel. Variasi ketebalan yang diuji mencakup 0 mm, 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. Parameter utama berupa kontras spekel, intensitas rata-rata, dan standar deviasi dihitung, kemudian hasilnya dianalisis menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk menentukan ketebalan optimal. Hasil menunjukkan bahwa ketebalan 2 mm menghasilkan stabilitas citra terbaik pada kondisi tanpa gangguan maupun dengan gangguan. Pola spekel pada ketebalan ini menampilkan distribusi kontras yang konsisten serta kluster PCA yang rapat, menandakan *noise* dapat ditekan secara efektif tanpa kehilangan detail mikrostruktur. Ketebalan 0 mm tidak mampu meredam fluktuasi, sedangkan 3 mm menurunkan kontras akibat peredaman berlebih. Temuan ini membuktikan bahwa *silicon rubber* 2 mm mampu meningkatkan rasio sinyal*

terhadap *noise* sekaligus menjaga kualitas citra spekel. Strategi sederhana ini berpotensi memperkuat keandalan LSI sebagai metode pencitraan non-destruktif yang cepat, portabel, dan dapat diterapkan pada berbagai bidang aplikasi.

Kata kunci: *Laser Speckle Imaging, Principal Component Analysis, Noise, Silicon rubber*

PENDAHULUAN

Pola *speckle* terbentuk ketika cahaya koheren mengenai permukaan dengan ketidakteraturan optik dan menghasilkan distribusi acak berupa bercak terang dan gelap [1]. Fenomena ini menyimpan informasi penting mengenai sifat mikrostruktur dan dinamika internal suatu sampel sehingga dimanfaatkan dalam berbagai bidang mulai dari medis, material, hingga pangan. Karakteristik pola *speckle* yang sangat sensitif terhadap variasi permukaan menjadikannya metode potensial untuk analisis non-destruktif dengan kecepatan tinggi dan tanpa persiapan sampel yang rumit [2].

Tantangan utama dalam pemanfaatan pola *speckle* terletak pada kerentanannya terhadap *noise* [3]. Variasi lingkungan, getaran mekanis, serta keterbatasan instrumen optik portabel dapat menurunkan kualitas citra dan menyebabkan inkonsistensi hasil analisis. *Noise* yang tidak terkendali berisiko menutupi informasi relevan pada pola *speckle* sehingga akurasi autentikasi dan klasifikasi sampel berkurang. Metode reduksi berbasis algoritma digital seperti *filtering*, *wavelet transform*, maupun *deep learning* telah dilaporkan efektif menekan sebagian *noise*, namun pendekatan ini sering kali berimplikasi pada hilangnya detail struktural penting [4]. Kondisi tersebut menegaskan perlunya pendekatan tambahan yang bersifat

fisik untuk meningkatkan kualitas sinyal sejak tahap akuisisi.

Material berbasis silikon menawarkan peluang baru sebagai lapisan optik pereduksi *noise*. Sifat elastis dan kemampuan meredam fluktuasi spektral menjadikan *silicon rubber* sebagai alternatif yang potensial untuk menstabilkan pola *speckle* [5], [6]. Penambahan lapisan *silicon rubber* pada konfigurasi optik tidak hanya mampu mengurangi distorsi, tetapi juga mempertahankan karakter non-destruktif dari *Laser Speckle Imaging* (LSI). Strategi berbasis material ini relatif sederhana, ekonomis, dan berpotensi lebih praktis untuk sistem portabel dibanding solusi berbasis *software*.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan luasnya aplikasi LSI, termasuk pemetaan mikrosirkulasi darah [7], [8], identifikasi karakteristik buah kelapa sawit [9], serta lapisan lilin lebah pada tomat [10]. Analisis statistik seperti *Principal Component Analysis* (PCA) terbukti efektif untuk mengekstrak informasi dominan dari data *speckle*, sekaligus meningkatkan rasio sinyal terhadap *noise* [11], [12]. Pendekatan ini dapat dimanfaatkan untuk menentukan ketebalan *silicon rubber* yang paling optimal dalam mereduksi *noise* tanpa mengorbankan kualitas *speckle*.

Penelitian ini mengusulkan integrasi *silicon rubber* sebagai lapisan pereduksi *noise* pada sistem *Laser Speckle Imaging* (LSI) portabel dengan dukungan analisis *Principal Component Analysis* (PCA) untuk

menentukan ketebalan optimal. Inovasi ini diharapkan mampu meningkatkan stabilitas citra *speckle*, mengurangi gangguan optik, serta memperkuat akurasi pengukuran secara non-destruktif.

METODE PENELITIAN

Rancangan Sistem

Rancangan sistem berbasis *Laser Speckle Imaging* (LSI) portabel terdiri atas gabungan komponen optik, mekanik, dan elektronik. Sistem disusun untuk menghasilkan pola *speckle* yang stabil, merekam citra dengan konsisten, serta melakukan analisis secara *real-time*.

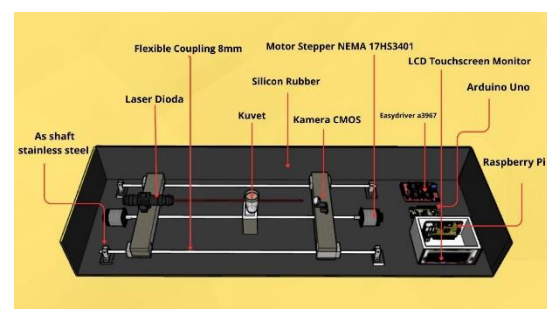
Laser dioda merah 650 nm berfungsi sebagai sumber cahaya koheren yang ditembakkan ke sampel dalam kuvet. Pantulan cahaya dari sampel membentuk pola *speckle* yang ditangkap sensor CMOS. Citra hasil tangkapan dikirim ke *Raspberry Pi* sebagai prosesor utama untuk dianalisis, sedangkan hasil olahan data ditampilkan melalui *LCD touchscreen monitor*.

Pengaturan posisi laser dan sampel dikendalikan oleh motor *stepper* NEMA 17HS3401 yang digerakkan *driver Easydriver* A3967. Pergerakan sistem didukung poros *stainless steel*, *leadscrew* T8, *pillow block bearing* KP08, dan *flexible coupling* sehingga laser dan sampel bergerak presisi sesuai kebutuhan. Lapisan *silicon rubber* dipasang pada rangkaian mekanik sebagai peredam getaran agar pola *speckle* tetap stabil saat proses akuisisi citra berlangsung.

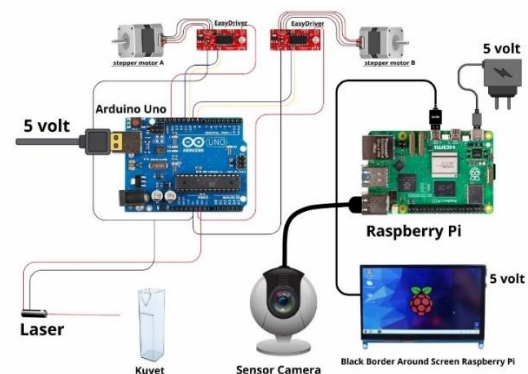
Arduino Uno bertugas sebagai pengendali motor *stepper* dengan program yang ditanamkan melalui Arduino IDE. Komunikasi data antara Arduino dan *Raspberry Pi* dijalankan menggunakan USB to TTL. Rangkaian elektronik disusun pada papan PCB dengan sambungan kabel *jumper*, sedangkan pushbutton dipasang untuk kontrol manual motor *stepper*.

Sampel penelitian terdiri dari tiga kategori minyak goreng, yaitu minyak

kemasan (A), minyak curah (B), serta minyak oplosan (C). Proses akuisisi citra dilakukan dengan MATLAB 2019b untuk mengekstraksi parameter kontras, intensitas rata-rata, dan standar deviasi. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode *Convolutional Neural Network* (CNN) pada *framework TensorFlow*, kemudian model terlatih diubah ke format *TensorFlow Lite* dan dijalankan di *Raspberry Pi*. Desain sistem *Laser Speckle Imaging* dapat dilihat pada **Gambar 1** dan skematik rangkaian sistem dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 1. Desain Sistem *Laser Speckle Imaging*



Gambar 2. Skematik Sistem *Laser Speckle Imaging*

Prosedur Akuisisi Data

Proses akuisisi data dilakukan dengan menyalakan laser dioda merah 650 nm yang diarahkan ke sampel dalam kuvet. Cahaya koheren dari laser mengenai sampel dan membentuk pola *speckle* yang direkam menggunakan sensor CMOS. Kamera dihubungkan ke *Raspberry Pi* untuk menyimpan citra sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut.

Setiap sampel diuji dengan variasi ketebalan *silicon rubber* sebesar 0 mm, 1 mm, 2 mm, dan 3 mm yang berfungsi sebagai peredam getaran. Variasi ketebalan ini digunakan untuk menilai kestabilan pola *speckle* pada kondisi yang berbeda.

Dari setiap sampel, pengambilan citra *speckle* dilakukan pada 10 titik dengan 3 kali perulangan untuk masing-masing dari 4 sisi kuvet. Setiap perulangan menghasilkan 10 *frame* gambar dalam format (.jpg), sehingga diperoleh total 1200 *frame* per sampel. Terdapat 3 jenis sampel yang diuji, sehingga dari setiap variasi jarak didapatkan total 3.600 *frame speckle*.

Ekstraksi Fitur Citra

Tahap ekstraksi fitur citra dilakukan untuk memperoleh parameter kuantitatif dari pola *speckle* yang dihasilkan oleh sampel. Tiga parameter utama yang digunakan adalah standar deviasi, intensitas rata-rata, dan kontras *speckle*. Ketiga parameter ini dipilih karena dapat merepresentasikan variasi distribusi cahaya yang terbentuk pada pola *speckle* dan sensitif terhadap perubahan karakteristik sampel.

Standar deviasi (σ) digunakan untuk menggambarkan tingkat sebaran nilai intensitas piksel terhadap rata-ratanya. Perhitungan standar deviasi ditunjukkan pada **Persamaan 1**.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad (1)$$

dengan I_i adalah nilai intensitas piksel ke- i , $\bar{I}$ adalah nilai rata-rata intensitas, dan N adalah jumlah total piksel.

Intensitas rata-rata ($\bar{I}$) dihitung untuk memperoleh nilai representatif dari keseluruhan distribusi cahaya *speckle*. Perhitungan intensitas rata-rata ditunjukkan pada **Persamaan 2**.

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (2)$$

Kontras *speckle* (K) digunakan untuk mengukur tingkat variasi intensitas terhadap rata-ratanya. Nilai kontras dihitung menggunakan **Persamaan 3**.

$$K = \frac{\sigma}{\bar{I}} \quad (3)$$

Ekstraksi fitur dilakukan pada setiap citra *speckle* hasil akuisisi dengan bantuan *software* MATLAB 2019b. Proses ini meliputi konversi citra dari format RGB ke *greyscale*, pembuatan histogram intensitas, dan perhitungan nilai standar deviasi, intensitas rata-rata, serta kontras sesuai dengan persamaan yang telah dijelaskan.

Metode Principal Component Analysis

Principal Component Analysis (PCA) digunakan untuk mereduksi dimensi data [12], [13] hasil ekstraksi citra *speckle* yang terdiri dari standar deviasi, intensitas rata-rata, dan kontras. Analisis ini dijalankan pada *Google Colab* untuk mempermudah pemrosesan data dan pencarian ketebalan silikon optimal. *Matriks kovarians* dihitung untuk mengetahui hubungan antar parameter dengan **Persamaan 4**.

$$C = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x})^T \quad (4)$$

Nilai *eigen* (λ) dan vektor *eigen* (v) dari *matriks kovarians* diperoleh melalui **Persamaan 5**.

$$Cv = \lambda v \quad (5)$$

Data kemudian diproyeksikan ke ruang komponen utama dengan **Persamaan 6**.

$$Z = XW \quad (6)$$

Hasil PCA berupa proyeksi data pada sumbu PC1 dan PC2 yang menjelaskan sebagian besar variasi data. Sebaran titik yang rapat menunjukkan ketebalan silikon lebih stabil, sedangkan sebaran melebar menandakan adanya *noise*. Ketebalan optimal ditentukan berdasarkan kluster yang paling kompak dan terpisah dengan jelas pada ruang PCA.

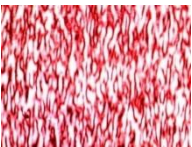
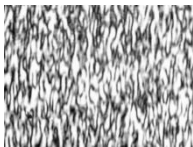
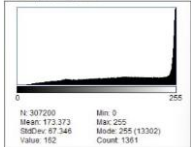
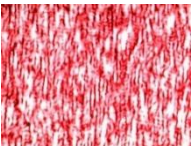
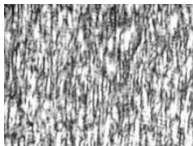
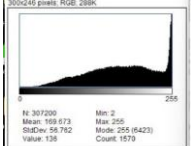
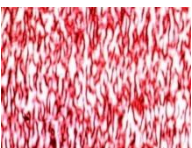
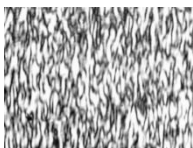
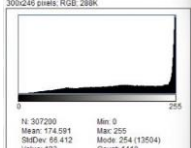
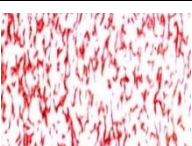
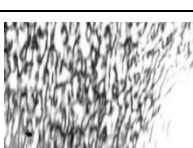
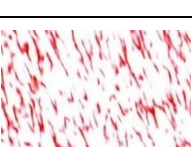
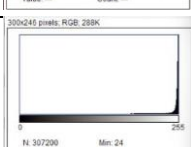
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan MATLAB dengan *ImageJ*

Pengolahan citra *speckle* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan dua

software berbeda, yaitu MATLAB dan *ImageJ*. Data hasil pengolahan citra ditampilkan **Tabel 1** yang memperlihatkan citra *speckle* diperoleh pada berbagai ketebalan peredam *silicon rubber* (0 mm, 1 mm, 2 mm, dan 3 mm). Citra tersebut disajikan dalam format RGB, *greyscale*, dan histogram sebagai representasi distribusi intensitas. **Tabel 2** dan **Tabel 3** menyajikan hasil kuantitatif berupa nilai standar deviasi, intensitas, dan kontras yang dihasilkan masing-masing *software*. Perbandingan ini dilengkapi dengan nilai *error* (%) untuk menilai sejauh mana kesesuaian hasil antara MATLAB dan *ImageJ*.

Tabel 1. Hasil Citra *Speckle*

Ketebalan Peredam	RGB	<i>Greyscale</i>	Histogram
0 mm			 N: 307200 Min: 0 Mean: 172.373 Max: 255 StdDev: 87.346 Mode: 255 (13302) Value: 162 Count: 1361
1 mm			 300x245 pixels, RGB, 28BK N: 307200 Min: 2 Mean: 169.673 Max: 255 StdDev: 56.762 Mode: 255 (6423) Value: 136 Count: 1579
2 mm			 300x245 pixels, RGB, 28BK N: 307200 Min: 0 Mean: 174.591 Max: 255 StdDev: 66.412 Mode: 254 (13504) Value: 193 Count: 1410
3 mm			 300x245 pixels, RGB, 28BK N: 307200 Min: 16 Mean: 220.774 Max: 255 StdDev: 51.300 Mode: 255 (81455) Value: --- Count: ---
B1			 300x245 pixels, RGB, 28BK N: 307200 Min: 0 Mean: 191.374 Max: 255 StdDev: 63.467 Mode: 255 (68233) Value: --- Count: ---
C1			 300x245 pixels, RGB, 28BK N: 307200 Min: 24 Mean: 232.796 Max: 255 StdDev: 42.202 Mode: 255 (112190) Value: 63 Count: 84

Tabel 2. Perbandingan Parameter Citra Tanpa Gangguan

Ketebalan	Kode	MATLAB			<i>ImageJ</i>			<i>Error (%)</i>
		Standar Deviasi	Intensitas	Kontras	Standar Deviasi	Intensitas	Kontras	
0 mm	A	67,341	173,188	0,3888	67,346	173,373	0,388	0,0993
	B	49,789	220,137	0,2262	49,893	220,475	0,226	0,0553
	C	30,454	242,111	0,1258	30,454	242,083	0,125	0,0116
1 mm	A	56,671	169,669	0,3340	56,762	169,673	0,334	0,158
	B	45,456	208,552	0,2180	45,463	208,528	0,218	0,026
	C	30,701	242,001	0,1269	30,703	242,002	0,126	0,005
2 mm	A	66,420	174,589	0,3804	66,412	174,591	0,380	0,013
	B	50,507	220,133	0,2294	50,509	220,133	0,229	0,004
	C	28,498	244,041	0,1168	28,518	244,042	0,116	0,069
3 mm	A	51,303	220,776	0,2324	51,300	220,774	0,232	0,004
	B	63,464	191,371	0,3316	63,467	191,374	0,331	0,003
	C	42,199	232,792	0,1813	42,202	232,796	0,181	0,005

Tabel 3. Perbandingan Parameter Citra dengan Gangguan

Ketebalan	Kode	MATLAB			<i>ImageJ</i>			<i>Error (%)</i>
		Standar Deviasi	Intensitas	Kontras	Standar Deviasi	Intensitas	Kontras	
0 mm	A	56,754	169,756	0,334	56,762	169,673	0,335	0,063
	B	45,398	208,428	0,218	45,463	208,528	0,218	0,095
	C	30,698	242,042	0,127	30,703	242,002	0,127	0,033
1 mm	A	66,394	174,583	0,380	66,412	174,591	0,380	0,023
	B	50,488	220,189	0,229	50,509	220,133	0,229	0,067
	C	28,544	244,111	0,117	28,518	244,042	0,117	0,063
2 mm	A	63,466	191,377	0,332	63,467	191,374	0,332	0,003
	B	51,303	220,777	0,232	51,301	220,774	0,232	0,003
	C	30,704	24,006	1,279	30,703	24,002	1,279	0,013
3 mm	A	66,422	174,585	0,380	66,412	174,591	0,380	0,018
	B	50,523	220,333	0,229	50,509	220,133	0,229	0,063
	C	28,531	244,112	0,117	28,518	244,042	0,117	0,017

Perbandingan pengolahan citra spekel menggunakan MATLAB dan *ImageJ* menunjukkan hasil yang sangat konsisten dengan selisih *error* dibawah 0,2%. Hal ini menandakan bahwa baik MATLAB maupun *ImageJ* sama-sama reliabel dalam menganalisis parameter optik citra spekel.

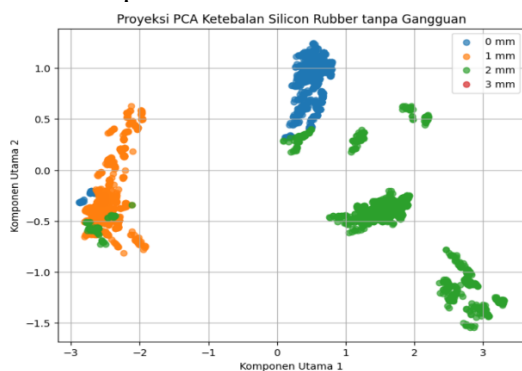
Ketebalan 2 mm memberikan hasil paling optimal, terlihat dari parameter citra yang stabil pada kedua *software* serta pola spekel yang lebih teratur dan konsisten. Distribusi bercak terang-gelap tampak jelas tanpa kehilangan detail struktur, sehingga informasi mikrostruktur dari sampel tetap

terjaga. Hal ini membuktikan bahwa peredaman *noise* berjalan efektif tanpa mengurangi kualitas spekel [15].

Pada ketebalan 3 mm, pola spekel mulai menunjukkan penurunan kontras. Kondisi ini menandakan efek peredaman berlebih yang cenderung melemahkan detail intensitas [16]. MATLAB dan *ImageJ* menghasilkan data yang hampir identik, secara visual dan numerik ketebalan 2 mm dapat dinyatakan sebagai kondisi paling stabil untuk menghasilkan citra spekel berkualitas tinggi.

Ketebalan Optimal dengan *Principal Component Analysis*

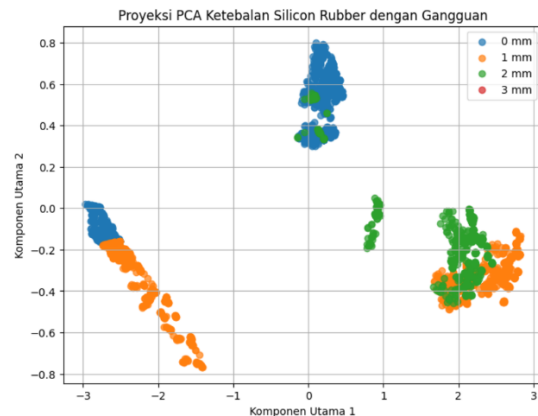
Analisis PCA digunakan untuk memproyeksikan data ketebalan silikon rubber pada sistem *Laser Speckle Imaging* (LSI) ke dalam ruang dua dimensi. Tujuan utama analisis ini adalah melihat separasi antar kelas ketebalan dan menentukan ketebalan yang paling optimal untuk pereduksi *noise* [17]. Kluster PCA pada **Gambar 3** dan **Gambar 4** memperlihatkan distribusi data citra *speckle* berdasarkan proyeksi komponen utama (PC1 dan PC2) untuk setiap variasi ketebalan *silicon rubber*.



Gambar 3. Kluster PCA Ketebalan *Silicon rubber* tanpa Gangguan

Pada kondisi tanpa gangguan, ketebalan 2 mm menghasilkan kluster paling kompak dengan pemisahan yang jelas dari variasi ketebalan lain [18]. Posisi titik data lebih terpusat sehingga variasi antar-sampel sangat kecil. Keadaan ini menunjukkan

bahwa silikon 2 mm mampu mereduksi gangguan optik internal serta menjaga konsistensi *speckle*.

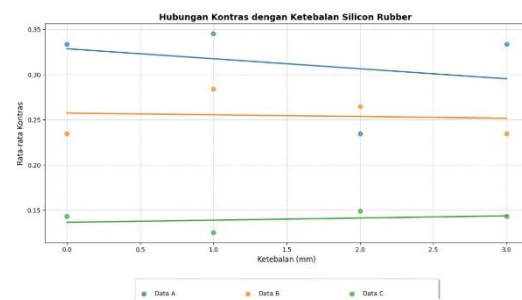


Gambar 4. Kluster PCA Ketebalan *Silicon rubber* dengan Gangguan

Pada kondisi dengan gangguan, pola distribusi semakin menegaskan peran ketebalan *silicon rubber*. Data dengan ketebalan 2 mm tetap mempertahankan kluster yang rapat, menandakan peredaman getaran mekanis dan fluktuasi cahaya tetap efektif. Perbandingan antara kondisi tanpa gangguan dan kondisi dengan gangguan menunjukkan bahwa ketebalan optimal terdapat pada 2 mm karena membentuk kluster yang paling jelas.

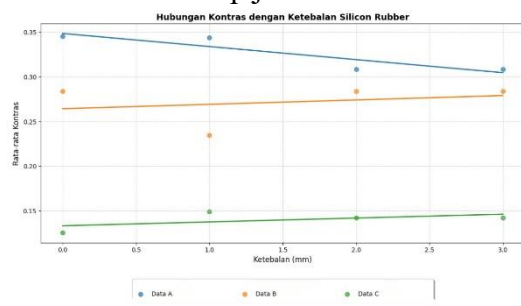
Ketebalan *Silicon rubber* Optimal Berdasarkan Nilai Kontras

Variasi ketebalan *silicon rubber* yang optimal berdasarkan kontras *speckle* dapat dilihat pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



Gambar 5. Kondisi Tanpa Gangguan

Pada grafik hubungan kontras spekel terhadap ketebalan *silicon rubber* pada kondisi tanpa gangguan, tren regresi linear menunjukkan perubahan kontras tidak signifikan pada ketebalan 2 mm, dengan sebaran data lebih rapat dibandingkan 0 mm, 1 mm, dan 3 mm. Kondisi ini menandakan pola spekel lebih konsisten pada ketebalan 2 mm, yang mampu menjaga detail mikrostruktur tetap jelas.



Gambar 6. Kondisi dengan Gangguan

Grafik hubungan kontras spekel terhadap ketebalan *silicon rubber* pada kondisi dengan gangguan dapat dilihat bahwa sampel A mengalami penurunan kontras yang cukup tajam, sedangkan B dan C menunjukkan kontras yang stabil hingga sedikit meningkat. Pola tersebut menegaskan bahwa *silicon rubber* berperan penting dalam meredam fluktuasi akibat gangguan eksternal [19]. Ketebalan 2 mm menghasilkan citra spekel paling stabil dengan kluster data yang rapat, menandakan *noise* dapat ditekan secara efektif tanpa mengurangi kualitas kontras.

Interpretasi dari kedua grafik menunjukkan ketebalan 2 mm sebagai kondisi paling stabil. Lapisan silikon setebal ini mampu memberikan peredaman mekanik yang optimal. Kondisi tanpa lapisan (0 mm) rentan terhadap gangguan, sedangkan ketebalan lebih besar (3 mm) dapat

mempengaruhi detail citra karena peredaman berlebihan [20], [21].

KESIMPULAN

Penelitian mengenai variasi ketebalan *silicon rubber* menunjukkan bahwa ketebalan 2 mm memberikan stabilitas citra spekel terbaik. Analisis kontras dan proyeksi PCA memperlihatkan kluster data pada ketebalan 2 mm lebih rapat serta terpisah dengan jelas dibandingkan variasi ketebalan lainnya. Kondisi tersebut menandakan *noise* berhasil ditekan tanpa kehilangan detail mikrostruktur. Ketebalan 0 mm rentan terhadap fluktuasi eksternal, sementara 3 mm mengurangi kontras karena peredaman berlebihan. Implementasi lapisan silikon setebal 2 mm mampu meningkatkan rasio sinyal terhadap *noise*, sehingga sistem LSI lebih andal digunakan secara portabel dan non-destruktif.

UCAPAN TE RIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih kepada dosen pembimbing, seluruh dosen fisika Universitas Muhammadiyah Riau dan rekan-rekan yang telah memberikan masukan, semangat, serta kerja sama selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Halpaap, M. Marconi, R. Hernandez, A. M. Yacomotti, J. Tiana-Alsina, and C. Masoller, "Experimental study of *speckle* patterns generated by low-coherence semiconductor laser light," *Chaos*, vol. 30, no. 6, 2020, doi: 10.1063/5.0006007.
- [2] M. Nikzadfar *et al.*, "Hyperspectral Imaging Aiding Artificial Intelligence: A Reliable Approach for Food Qualification and Safety," *Appl.*

- Sci.*, vol. 14, no. 21, pp. 1–33, 2024, doi: 10.3390/app14219821.
- [3] S. L. Purwowiyoto, “Aplikasi Klinis Ekokardiografi Dua Dimensi *Speckle* Tracking pada Pasien Gagal Jantung,” *J. Kedokt.*, vol. 25, no. 1, p. 1, 2017.
- [4] Ira Puspasari, “Implementasi transformasi wavelet untuk reduksi *noise* dan dekomposisi energi sinyal phonocardiogram,” *INFOTECH J. Inform. Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 81–95, 2025, doi: 10.37373/infotech.v6i1.1650.
- [5] A. A. Rosidah and V. A. Setyowati, “Fabrication and simulation studies on sound absorption coefficient of natural microfibers reinforced silicone rubber,” *SINTEK J. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 16, no. 2, p. 104, 2022, doi: 10.24853/sintek.16.2.104-111.
- [6] J. H. Yang, X. D. Yang, Q. K. Han, and J. G. Liu, “Post-buckling spring vibration isolator using silicone gel column: A theoretical and experimental study,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 22, 2021, doi: 10.3390/app112210559.
- [7] O. Zhukov, D. D. Postnov, K. H. Hejn, K. Ravnskjaer, and O. Sosnovtseva, “Laser *speckle* contrast imaging of hepatic microcirculation,” *Biomed. Opt. Express*, vol. 16, no. 4, p. 1299, 2025, doi: 10.1364/boe.554663.
- [8] Y. X. Chen, W. L. Han, G. Y. Bin, S. C. Wu, S. P. Morgan, and S. Sun, “Quantum machine learning enhanced laser *speckle* analysis for precise speed prediction,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-78884-4.
- [9] W. F. Neneng Fitrya, Shabri Putra Wirman, “IDENTIFIKASI KARAKTERISTIK BUAH KELAPA SAWIT SIAP PANEN DENGAN METODE LASER SPEKEL IMAGING (LSI),” *Photon*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2018, [Online]. Available: <http://ejurnal.umri.ac.id/index.php/photon/article/view/1057/612>
- [10] K. Fitri and H. Harmadi, “Analisis Kontras Optis Lapisan Lilin Lebah pada Buah Tomat dengan Metode Laser *Speckle* Imaging,” *J. Fis. Unand*, vol. 6, no. 1, pp. 53–60, 2017, doi: 10.25077/jfu.6.1.53-60.2017.
- [11] D. Malavi, K. Raes, and S. Van Haute, “Integrating near-infrared hyperspectral imaging with machine learning and feature selection: Detecting adulteration of extra-virgin olive oil with lower-grade olive oils and hazelnut oil,” *Curr. Res. Food Sci.*, vol. 9, no. August, p. 100913, 2024, doi: 10.1016/j.crfs.2024.100913.
- [12] M. Wangge, “Penerapan Metode *Principal Component Analysis* (PCA) Terhadap Faktor-faktor yang Mempengaruhi Lamanya Penyelesaian Skripsi Mahasiswa Program Studi Pendidikan Matematika FKIP UNDANA,” *J. Cendekia J. Pendidik. Mat.*, vol. 5, no. 2, pp. 974–988, 2021, doi: 10.31004/cendekia.v5i2.465.
- [13] H. Widi, “Polisi Tetapkan 13 Tersangka Kasus Penyalahgunaan Minyakita,” Kompas.id.
- [14] D. Romahadi and R. Putra Youlia, “Analisis Getaran Displacement Drum Roller Menggunakan Fast Fourier Transform dan Short Time Fourier Transform,” *J. Tek. Mesin*,

- vol. 12, no. 1, p. 41, 2023.
- [15] L. A. Muzahab, “Pengaruh Pemasangan Peredam Getaran Eksternal Tipe Viscous terhadap Kinerja Struktur Gedung,” *J. Tek. Media Pengemb. Ilmu dan Apl. Tek.*, vol. 17, no. 1, p. 36, 2018, doi: 10.26874/jt.vol17no1.59.
- [16] S. J. F. Sembiring, “Review Faktor Pengaruh Perubahan Frekuensi Alami Pada Struktur Bangunan,” *J. Kaji. Tek. Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 70–79, 2024, doi: 10.52447/jkts.v9i2.7694.
- [17] D. Wulandari, T. Prahasto, and V. Gunawan, “Penerapan *Principal Component Analysis* untuk Mereduksi Dimensi Data Penerapan Teknologi Informasi dan Komunikasi untuk Pendidikan di Sekolah,” *J. Sist. Inf. Bisnis*, vol. 6, no. 2, p. 91, 2016, doi: 10.21456/vol6iss2pp91-96.
- [18] M. H. M. Rohman *et al.*, “Clustering Analysis of Stunting Risk Factors Using K-Means and Principal Component Analysis: A Case Study in Indonesian Regency,” *Sinkron*, vol. 9, no. 1, pp. 65–77, 2025, doi: 10.33395/sinkron.v9i1.14311.
- [19] A. Ansar, N. Nurhasmi, and A. Amir, “Pengukuran Koefisien Atenuasi Fantom Berbasis Silicone Rubber RTV 48,” *Wahana Fis.*, vol. 7, no. 1, pp. 43–53, 2022, doi: 10.17509/wafi.v7i1.41219.
- [20] F. Yu *et al.*, “Quantitative analysis of errors caused by vibration on polarization parametric indirect microscopic imaging system,” *Appl. Opt.*, vol. 60, no. 8, p. 2141, 2021, doi: 10.1364/ao.414609.
- [21] A. Mohamed, A. A. Omer, and A. Hassan, “Effect of damping material thickness on vibration analysis in pretension layer damping process,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1172, no. 1, p. 012006, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1172/1/012006.