



Analisis Citra Digital Sederhana untuk Kuantifikasi Kerusakan Mekanis Buah Pisang Setelah Simulasi Transportasi

Simple Image Processing Analysis for Quantifying Mechanical Damage in Bananas after Transport Simulation

Wahyu Hidayat¹ *, Cicih Sugianti²

¹ Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung

² Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

*Corresponding Author: wahyuhidayat@radenintan.ac.id

Abstract. Bruising is a common form of mechanical damage occurring in bananas during transport that can reduce fruit quality. This study aimed to determine the optimal threshold for measuring banana bruise areas using digital image analysis and to evaluate the effects of vibration frequency and duration on bruise development during storage. The percentage of bruised area was derived from image segmentation using ImageJ at threshold values of 120, 130, 140, 150, and 160. The optimal threshold was selected using Principal Component Analysis (PCA), while treatment effects were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and Duncan's post-hoc test. PCA results indicated that all thresholds were strongly correlated and represented similar information; consequently, a threshold of 150 was selected as the best option based on statistical results and visual evaluation of the segmentation. ANOVA results showed that the interaction between vibration frequency and duration had a highly significant effect on the percentage of bruised area, whereas duration alone did not have a significant effect. Duncan's test revealed that the 10 Hz–60 minute combination resulted in the lowest percentage of bruised area, while the 30 Hz–60 minute combination resulted in the highest. This study demonstrates that a threshold of 150 can serve as a basis for quantifying banana bruising and that the extent of bruising during transport simulation is influenced by the combination of vibration frequency and duration.

Keywords: Banana bruising, Image analysis, Threshold selection, PCA, Postharvest quality.

1. Pendahuluan

Pisang merupakan salah satu komoditas hortikultura penting yang banyak dibudidayakan dan dikonsumsi di berbagai negara tropis, termasuk Indonesia. Buah ini memiliki nilai ekonomi yang tinggi karena kandungan nutrisi yang baik, ketersediaan sepanjang tahun, serta permintaan pasar yang terus meningkat. Namun demikian, pisang termasuk buah klimakterik yang rentan mengalami penurunan mutu selama proses panen, penanganan pascapanen, transportasi, dan distribusi. Berbagai faktor selama rantai pasok dapat menyebabkan kerusakan fisik yang berdampak pada penurunan kualitas dan nilai jual buah (Al Dairi et al., 2021).

Pisang merupakan komoditas hortikultura yang sangat rentan mengalami penurunan mutu selama penanganan pascapanen, terutama pada tahap distribusi dan transportasi. Sebagai buah klimakterik, pisang terus mengalami perubahan fisiologis setelah panen sehingga kualitasnya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan perlakuan mekanis selama rantai pasok. Menurut Sugianti et al. (2022), keberhasilan penanganan pascapanen pisang sangat ditentukan oleh penerapan teknologi yang mampu mempertahankan mutu buah, mengurangi kehilangan hasil, dan menekan kerusakan selama distribusi. Dalam konteks ini, kerusakan mekanis seperti memar menjadi salah satu masalah utama karena tidak hanya menurunkan penampilan buah, tetapi juga mempercepat kemunduran mutu dan mengurangi nilai jual produk.

Salah satu bentuk kerusakan yang sering ditemukan pada buah pisang adalah kerusakan mekanis berupa memar (*bruising*). Kerusakan ini dapat terjadi akibat benturan, tekanan, getaran, atau gesekan selama proses penanganan dan distribusi. Menurut Opara dan Pathare (2014), memar merupakan salah satu penyebab utama kehilangan kualitas pada produk hortikultura segar karena dapat memicu kerusakan jaringan, perubahan warna, peningkatan laju respirasi, dan percepatan proses pembusukan. Pada buah pisang, memar umumnya ditandai dengan munculnya area berwarna cokelat hingga kehitaman yang menyebabkan penurunan kualitas visual dan daya terima konsumen (Pathare et al., 2022).

Penilaian kerusakan mekanis pada buah umumnya masih dilakukan melalui pengamatan visual. Meskipun metode ini mudah diterapkan, hasil yang diperoleh sering kali bersifat subjektif karena dipengaruhi oleh pengalaman dan persepsi masing-masing pengamat. Selain itu, pengukuran luas memar secara manual memerlukan waktu yang relatif lama dan sulit diterapkan pada jumlah sampel yang besar. Keterbatasan tersebut mendorong perlunya metode evaluasi yang lebih objektif, cepat, dan mampu menghasilkan data kuantitatif untuk mendukung pengendalian mutu produk hortikultura (Huseain, 2020).

Selain faktor mekanis, kondisi suhu selama penyimpanan dan distribusi juga memegang peranan penting terhadap stabilitas mutu pisang. Penelitian Sugianti et al. (2024) menunjukkan bahwa pisang hijau memiliki batas toleransi tertentu terhadap suhu tinggi, dan paparan suhu yang melebihi ambang toleransi dapat mempercepat penurunan mutu buah. Hal ini menunjukkan bahwa mutu pisang selama distribusi dipengaruhi oleh kombinasi faktor fisiologis dan lingkungan, termasuk suhu serta tekanan mekanis yang diterima buah. Oleh karena itu, kajian mengenai perkembangan memar pisang akibat perlakuan getaran selama simulasi transportasi menjadi penting untuk dilakukan, karena dapat memberikan dasar ilmiah dalam merancang sistem distribusi yang lebih aman dan efektif untuk mempertahankan mutu pisang pascapanen.

Perkembangan teknologi pengolahan citra digital (*digital image processing*) telah membuka peluang baru dalam bidang penilaian mutu produk pertanian secara non-destruktif. Teknologi ini memungkinkan ekstraksi informasi visual dari suatu objek melalui analisis parameter warna, tekstur, bentuk, maupun luas area kerusakan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa analisis citra digital dapat digunakan untuk mendeteksi dan mengukur kerusakan pada buah dengan tingkat akurasi yang tinggi serta waktu analisis yang relatif singkat (Dua, Z et al., 2020). Oleh karena itu, metode ini semakin banyak dimanfaatkan dalam kegiatan inspeksi mutu produk hortikultura.

Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam analisis citra adalah ImageJ. Perangkat lunak ini dikembangkan sebagai perangkat lunak sumber terbuka (*open source*) yang menyediakan berbagai fungsi untuk pengolahan dan analisis citra, seperti segmentasi objek, pengukuran luas area, analisis warna, dan ekstraksi fitur visual lainnya. Keunggulan ImageJ terletak pada kemudahan penggunaan, fleksibilitas, serta kemampuannya untuk menghasilkan data kuantitatif tanpa memerlukan perangkat keras yang mahal. Penelitian yang dilakukan oleh Al-Dairi et al. (2024) menunjukkan bahwa analisis citra digital menggunakan perangkat lunak terbuka dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur tingkat kerusakan mekanis pada buah secara efektif.

Penerapan analisis citra digital menggunakan ImageJ berpotensi menjadi solusi sederhana dan ekonomis dalam kuantifikasi kerusakan mekanis pada buah pisang. Dengan memanfaatkan citra yang diperoleh dari kamera digital atau telepon pintar, luas area memar dapat dihitung secara objektif sehingga menghasilkan informasi yang lebih akurat dibandingkan pengamatan visual semata. Selain itu, pendekatan ini dapat mendukung pengembangan sistem penilaian mutu berbasis teknologi informasi yang lebih efisien dan mudah diterapkan pada skala laboratorium maupun industri.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan analisis citra digital menggunakan perangkat lunak ImageJ dalam mengkuantifikasi kerusakan mekanis pada buah pisang. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan alternatif metode non-destruktif yang objektif, praktis, dan berbiaya rendah untuk mendukung evaluasi mutu buah pisang selama penanganan pascapanen.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan satu unit Transportation Tester BF50UT (IDEX Co., Ltd.) sebagai alat untuk mensimulasikan getaran selama proses transportasi buah pisang. Dokumentasi dan akuisisi citra dilakukan menggunakan kamera digital CANON EOS Kiss X7. Analisis citra untuk mengukur tingkat kerusakan mekanis berupa memar pada buah pisang dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah buah pisang yang dikemas dalam satu kotak (*box*) berkapasitas 10 kg.

Penelitian menggunakan rancangan faktorial dengan dua faktor, yaitu frekuensi getaran dan lama getaran. Faktor pertama adalah frekuensi getaran yang terdiri atas tiga taraf, yaitu 10 Hz, 20 Hz, dan 30 Hz. Faktor kedua adalah durasi getaran yang terdiri atas tiga taraf, yaitu 30 menit, 60 menit, dan 90 menit. Kombinasi kedua faktor menghasilkan sembilan perlakuan simulasi transportasi.

2.1 Prosedur Simulasi Transportasi

Buah pisang yang telah dikemas dalam kotak berkapasitas 10 kg ditempatkan pada meja getar Transportation Tester BF50UT. Sebelum perlakuan, kondisi fisik buah didokumentasikan menggunakan kamera digital CANON EOS Kiss X7 untuk memperoleh citra awal sebagai data pembandingan.

Simulasi transportasi dilakukan dengan memberikan getaran sesuai kombinasi perlakuan frekuensi dan durasi yang telah ditentukan. Frekuensi getaran diatur pada 10 Hz, 20 Hz, atau 30 Hz, sedangkan lama paparan getaran diatur selama 30 menit, 60 menit, atau 90 menit. Selama proses simulasi, kotak berisi pisang dibiarkan menerima getaran secara kontinu hingga waktu perlakuan tercapai.

Setelah simulasi selesai, buah pisang dikeluarkan dari kemasan dan disimpan dalam inkubator dengan suhu 15°C untuk diamati gejala memar secara visual. Selanjutnya, setiap buah didokumentasikan menggunakan kamera digital dengan kondisi pencahayaan dan jarak pengambilan gambar yang seragam. Citra yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan perangkat

lunak ImageJ untuk mengidentifikasi dan mengukur luas area memar yang muncul akibat perlakuan getaran.

2.2 Prosedur Pengolahan Citra

2.2.1 Pengambilan Citra

Buah pisang yang telah mengalami perlakuan kerusakan mekanis difoto menggunakan kamera digital dengan posisi kamera tegak lurus terhadap objek pada jarak yang tetap. Pengambilan gambar dilakukan di dalam kotak pencahayaan (*light box*) atau pada kondisi pencahayaan yang seragam untuk meminimalkan pengaruh bayangan dan variasi intensitas cahaya. Setiap buah diletakkan pada latar belakang berwarna putih untuk memudahkan proses segmentasi objek. Citra disimpan dalam format JPEG dengan resolusi yang sama untuk seluruh sampel.

2.2.2 Pra-pemrosesan Citra

Citra yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ versi 1.54. Tahap awal analisis dilakukan dengan membuka citra pada ImageJ dan melakukan kalibrasi skala menggunakan objek referensi yang diketahui dimensinya. Kalibrasi dilakukan melalui menu *Analyze* → *Set Scale* sehingga hasil pengukuran dapat dinyatakan dalam satuan luas aktual (cm²).

Selanjutnya dilakukan pemotongan (*cropping*) pada area yang berisi objek pisang untuk menghilangkan bagian latar belakang yang tidak diperlukan. Jika diperlukan, citra dikonversi ke format 8-bit atau ruang warna RGB guna memudahkan proses segmentasi area memar.

2.2.3 Segmentasi Area Memar

Segmentasi bertujuan memisahkan area memar dari jaringan buah yang masih normal. Proses ini dilakukan menggunakan fitur *Color Threshold* pada ImageJ melalui menu *Image* → *Adjust* → *Color Threshold*. Nilai ambang (*threshold*) ditentukan berdasarkan perbedaan warna antara area memar yang cenderung berwarna cokelat gelap dengan permukaan buah yang masih normal.

Setelah parameter ambang ditentukan, area memar akan ditampilkan sebagai wilayah terpilih (*selected area*). Hasil segmentasi kemudian dikonversi menjadi citra biner (*binary image*) sehingga area memar dan area normal dapat dibedakan dengan jelas.

2.3 Prosedur Penentuan Luas Area Menggunakan ImageJ

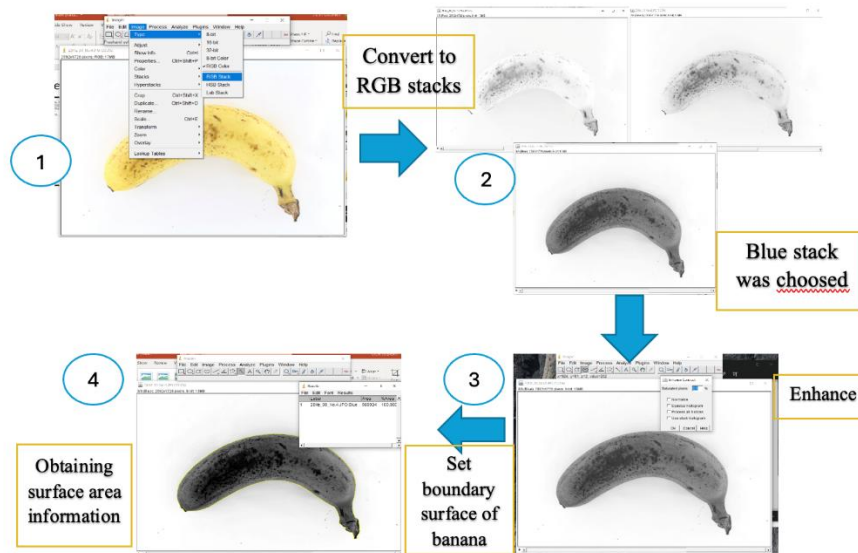
Analisis citra dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ untuk menentukan luas permukaan buah pisang dan area kerusakan yang diamati. Citra digital buah pisang terlebih dahulu dimasukkan ke dalam perangkat lunak ImageJ dengan metode *drag and drop*. Setelah citra terbuka, gambar dikonversi menjadi tumpukan kanal warna RGB (*RGB Stack*) melalui menu *Image* → *Type* → *RGB Stack* sehingga diperoleh tiga kanal warna, yaitu merah (*red*), hijau (*green*), dan biru (*blue*).

Kanal warna biru (*blue channel*) kemudian dipilih untuk proses analisis karena memberikan kontras yang lebih baik antara objek pisang dan latar belakang. Selanjutnya, kualitas citra ditingkatkan menggunakan fitur *Enhance Contrast* melalui menu *Process* → *Enhance Contrast* dengan nilai *saturated pixel* sebesar 0,5%. Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan perbedaan intensitas warna antara objek dan latar belakang sehingga memudahkan proses segmentasi.

Setelah peningkatan kontras dilakukan, batas permukaan buah pisang ditentukan menggunakan *Wand Tool*. Nilai *tolerance* disesuaikan secara bertahap hingga seluruh area permukaan pisang dapat terseleksi secara akurat tanpa mencakup area latar belakang. Seleksi yang diperoleh digunakan sebagai representasi luas permukaan buah yang akan diukur.

Pengukuran luas dilakukan dengan mengaktifkan parameter area melalui menu *Analyze* → *Set Measurements* dan memilih opsi *Area*. Setelah parameter pengukuran ditetapkan, luas permukaan

buah yang telah terseleksi dihitung menggunakan perintah *Measure* pada menu *Analyze* → *Measure*. Hasil pengukuran kemudian ditampilkan dalam jendela *Results* berupa nilai luas area yang digunakan sebagai data untuk analisis lebih lanjut. Prosedur pengukuran dapat dilihat pada Gambar 1.



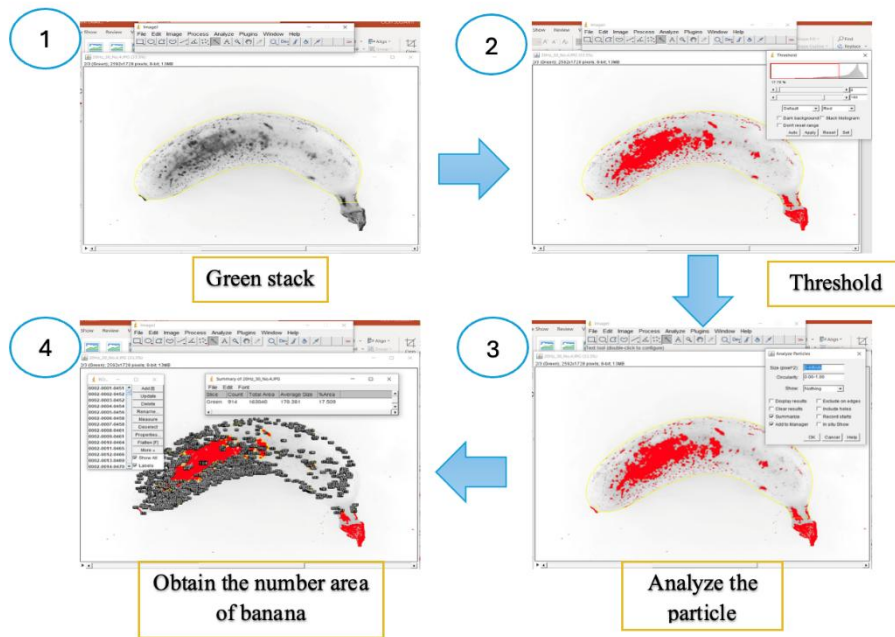
Gambar 1. Prosedur penentuan luas area pisang menggunakan ImageJ

2.4 Penentuan Area Memar pada Buah Pisang Menggunakan ImageJ

Setelah luas total permukaan buah pisang diperoleh, analisis dilanjutkan untuk menentukan luas area memar atau area berwarna gelap pada permukaan buah. Kanal warna hijau (*green stack*) dari citra RGB dipilih karena mampu memberikan kontras yang lebih jelas antara area memar dan jaringan buah yang masih normal. Selanjutnya, batas permukaan buah pisang ditentukan menggunakan *Wand Tool* dengan penyesuaian nilai *tolerance* hingga seluruh area permukaan buah terseleksi secara akurat.

Untuk mengidentifikasi area memar, dilakukan proses *thresholding* melalui menu *Image* → *Adjust* → *Threshold*. Nilai ambang (*threshold*) disesuaikan hingga area memar atau area berwarna hitam pada permukaan pisang dapat tersegmentasi dengan jelas dari area normal. Hasil segmentasi menghasilkan citra biner yang membedakan area memar dan area non-memar berdasarkan perbedaan intensitas warna.

Luas area memar kemudian dihitung menggunakan fitur *Analyze Particles* melalui menu *Analyze* → *Analyze Particles*. Pada tahap ini, opsi *Summary* dan *Add to Manager* dipilih untuk memperoleh ringkasan hasil pengukuran sekaligus menyimpan area yang teridentifikasi. Hasil analisis memberikan informasi mengenai luas total area berwarna hitam (memar) pada permukaan buah pisang.



Gambar 2. Prosedur penentuan luas membran pisang menggunakan ImageJ

2.5 Perhitungan Persentase Memar

Persentase area memar dihitung dengan membandingkan luas area memar terhadap luas total permukaan buah pisang menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Persentase Area Memar (\%)} = \frac{\text{Luas Area Memar}}{\text{Luas Total Permukaan Buah}} \times 100 \quad (1)$$

dimana luas area memar adalah total luas area berwarna hitam yang teridentifikasi pada permukaan pisang (cm^2), luas total permukaan buah adalah luas keseluruhan permukaan pisang yang terukur pada citra (cm^2).

Nilai persentase area memar yang diperoleh digunakan sebagai indikator tingkat kerusakan mekanis pada buah pisang akibat perlakuan yang diberikan. Semakin besar persentase area memar, semakin tinggi tingkat kerusakan mekanis yang dialami oleh buah.

2.6 Analisis Data

Data luas memar dan persentase kerusakan mekanis dari setiap sampel direkap dalam lembar kerja *spreadsheet* untuk dianalisis lebih lanjut. Penentuan *threshold* terbaik dilakukan melalui analisis data persentase area memar hasil segmentasi citra pada beberapa nilai *threshold*, yaitu 120, 130, 140, 150, dan 160. Data persentase area memar dari masing-masing *threshold* dianalisis menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mengevaluasi hubungan antar-*threshold*, mengetahui tingkat redundansi informasi, dan menentukan *threshold* yang paling representatif. Sebelum PCA dilakukan, kelayakan data diuji menggunakan *Kaiser-Meyer-Olkin* (KMO) dan *Bartlett's Test of Sphericity*. Pemilihan *threshold* terbaik didasarkan pada nilai *loading* komponen utama, kontribusi terhadap keragaman total, serta hasil evaluasi visual segmentasi citra untuk memastikan *threshold* yang dipilih mampu mengekstraksi area memar secara akurat dan stabil. *Threshold* terpilih kemudian digunakan sebagai variabel respons pada analisis statistik lanjutan. Data *threshold* terbaik dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap tingkat kerusakan mekanis buah pisang.

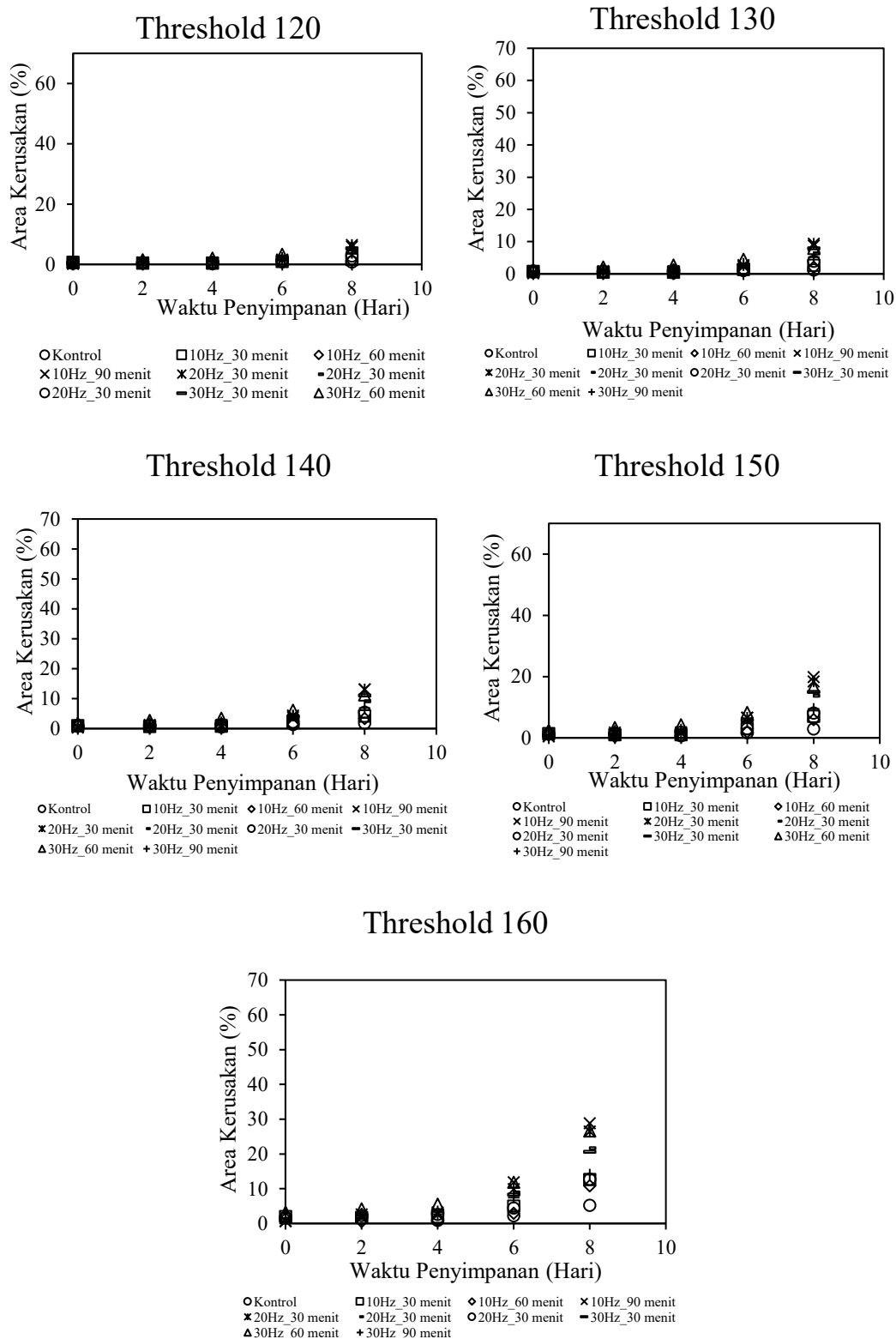
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis *Principal Component Analysis (PCA)* dan pemilihan *Threshold*

Pemilihan *threshold* terbaik merupakan tahap penting dalam analisis citra membran pisang, karena nilai *threshold* yang digunakan akan menentukan ketepatan segmentasi area membran dari latar belakang kulit buah. Pada penelitian ini dilakukan *screening threshold* pada rentang 120 sampai 160 untuk memperoleh nilai ambang yang paling representatif dalam mengekstraksi area membran pisang hasil simulasi transportasi. Rentang *threshold* tersebut dipilih karena berada pada kisaran intensitas yang secara visual masih mampu membedakan area membran berwarna gelap dari jaringan kulit pisang yang normal, namun tetap berpotensi menghasilkan perbedaan sensitivitas segmentasi. *Threshold* yang terlalu rendah dapat menyebabkan sebagian area membran tidak terdeteksi (*under-segmentation*), sedangkan *threshold* yang terlalu tinggi dapat memperluas area hasil segmentasi hingga memasukkan bayangan, *noise*, atau bagian kulit normal sebagai area membran (*over-segmentation*). *Screening threshold* dilakukan untuk menyeleksi nilai ambang yang paling sesuai sehingga hasil pengukuran persentase area membran dapat digunakan secara lebih akurat pada analisis statistik selanjutnya.

Gambar 3 adalah nilai area membran pada masing-masing *threshold* yang diaplikasikan. Kemudian data persentase area membran pada *threshold* 120, 130, 140, 150, dan 160 dianalisis menggunakan *Principal Component Analysis (PCA)*. Analisis ini dilakukan untuk melihat hubungan antar-*threshold*, mengidentifikasi adanya redundansi informasi, serta menentukan *threshold* yang paling representatif untuk digunakan pada analisis lanjutan. Hasil PCA menunjukkan bahwa seluruh *threshold* memiliki korelasi yang sangat kuat dan cenderung merepresentasikan satu dimensi informasi yang sama, yaitu tingkat membran pisang. Komponen utama pertama mampu menjelaskan sebagian besar keragaman data, sehingga menunjukkan bahwa variasi persentase area membran pada *threshold* 120–160 pada dasarnya menggambarkan fenomena yang serupa. Dengan demikian, pemilihan *threshold* terbaik tidak hanya didasarkan pada besarnya kontribusi statistik terhadap komponen utama, tetapi juga mempertimbangkan kualitas segmentasi visual agar *threshold* yang dipilih mampu mengekstraksi area membran secara akurat, konsisten, dan minim *noise*.

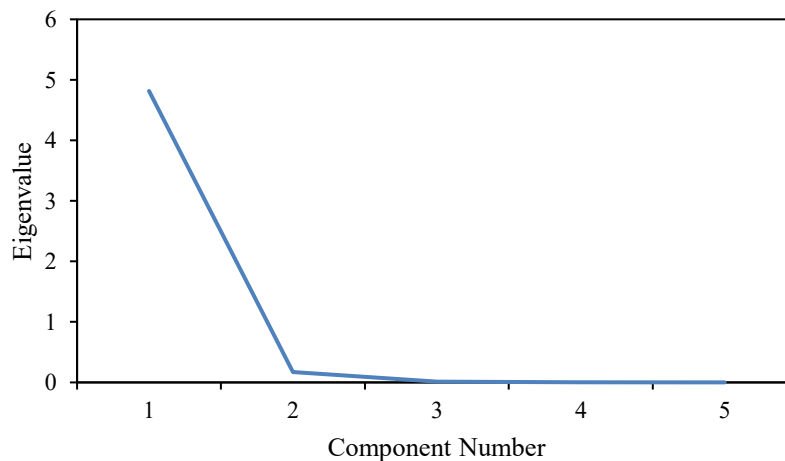
Analisis *Principal Component Analysis (PCA)* dilakukan terhadap data persentase area membran pisang yang diperoleh dari hasil segmentasi citra pada lima nilai *threshold*, yaitu 120, 130, 140, 150, dan 160. Tujuan analisis ini adalah untuk mengevaluasi hubungan antar-*threshold*, mengetahui tingkat redundansi informasi yang dihasilkan oleh masing-masing *threshold*, serta memilih *threshold* yang paling representatif untuk analisis lanjutan. Pendekatan ini relevan karena dalam analisis citra, beberapa nilai *threshold* yang berdekatan sering kali menghasilkan informasi yang saling berkorelasi, sehingga diperlukan metode reduksi dimensi untuk mengidentifikasi variabel yang paling mewakili variasi data secara keseluruhan. PCA telah banyak digunakan dalam pengolahan citra untuk mengekstraksi informasi utama, mereduksi dimensi data, serta memilih fitur atau kanal yang paling informatif dalam deteksi kerusakan atau cacat pada buah (Mei & Li, 2023; Wu et al., 2020).

Gambar 3. Persentase area memar dengan aplikasi perbedaan *threshold*

Hasil PCA menunjukkan bahwa data *threshold* layak dianalisis lebih lanjut, yang ditunjukkan oleh nilai Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) sebesar 0,632 dan Bartlett's Test of Sphericity yang signifikan ($p < 0,001$). Nilai tersebut mengindikasikan bahwa antar-variabel *threshold* terdapat korelasi yang cukup kuat sehingga PCA dapat diterapkan untuk merangkum struktur informasi pada data. Matriks korelasi juga memperlihatkan bahwa seluruh *threshold* memiliki hubungan yang sangat

kuat, dengan koefisien korelasi berkisar antara 0,868–0,992. Korelasi yang sangat tinggi ini menunjukkan bahwa *threshold* 120–160 pada dasarnya mengukur fenomena yang sama, yaitu luas area membran pisang, meskipun dengan sensitivitas segmentasi yang sedikit berbeda. Dalam konteks pengolahan citra, kondisi ini umum terjadi ketika beberapa nilai *threshold* berada pada rentang intensitas yang berdekatan, sehingga perbedaan hasil segmentasi lebih bersifat kuantitatif daripada kualitatif. *Thresholding* sendiri merupakan metode segmentasi yang memisahkan objek dari latar berdasarkan nilai intensitas, sehingga perbedaan kecil pada nilai ambang dapat menghasilkan luasan objek yang berbeda, tetapi tetap berada pada pola informasi yang sama (Abd et al., 2023; Petrellis, 2018).

Berdasarkan hasil ekstraksi komponen utama, diperoleh bahwa komponen utama pertama (PC1) memiliki *eigenvalue* 4,831 dan mampu menjelaskan 96,32% total keragaman data, sedangkan komponen kedua hanya menjelaskan 3,41% (Gambar 4 dan Tabel 1). Dominasi PC1 yang sangat tinggi menunjukkan bahwa hampir seluruh variasi pada nilai persentase area membran hasil *threshold* 120–160 dapat direpresentasikan hanya oleh satu komponen utama. Dengan demikian, seluruh *threshold* tersebut dapat dipandang sebagai serangkaian pengukuran yang sangat serupa terhadap satu konstruk yang sama, yaitu intensitas membran. Temuan ini sejalan dengan berbagai studi pengolahan citra pertanian yang menunjukkan bahwa PCA efektif untuk mengidentifikasi kanal, panjang gelombang, atau fitur citra yang paling relevan dalam mendeteksi membran, sekaligus mengurangi redundansi informasi antar-variabel citra (Mei & Li, 2023; Wu et al., 2020).



Gambar 4. Nilai hasil Scree Plot

Nilai *loading* pada komponen utama pertama juga menunjukkan pola yang sangat seragam, yaitu 0,442 untuk T120; 0,451 untuk T130; 0,455 untuk T140; 0,451 untuk T150; dan 0,437 untuk T160. *Loading* yang relatif setara mengindikasikan bahwa seluruh *threshold* memberikan kontribusi yang hampir sama besar dalam membentuk komponen utama membran. Dengan kata lain, secara statistik tidak terdapat satu *threshold* yang secara mutlak paling dominan dibanding *threshold* lainnya. Oleh karena itu, pemilihan *threshold* terbaik tidak dapat didasarkan pada nilai *loading* PCA semata, tetapi perlu mempertimbangkan kualitas segmentasi visual agar *threshold* yang dipilih tidak hanya representatif secara statistik, tetapi juga akurat dalam mengekstraksi area membran yang sebenarnya. Prinsip ini sejalan dengan literatur segmentasi citra, di mana pemilihan *threshold* yang baik harus mempertimbangkan keseimbangan antara kemampuan memisahkan objek dari latar belakang, meminimalkan *noise*, serta mempertahankan bentuk area target secara realistis. Pada deteksi membran buah, *threshold* yang terlalu rendah dapat menyebabkan area membran tidak tersegmentasi secara utuh, sedangkan *threshold* yang terlalu tinggi berpotensi menimbulkan *over-*

segmentation dan memasukkan area non-memar ke dalam objek hasil segmentasi (Lu & Lu, 2017; Ünal et al., 2024).

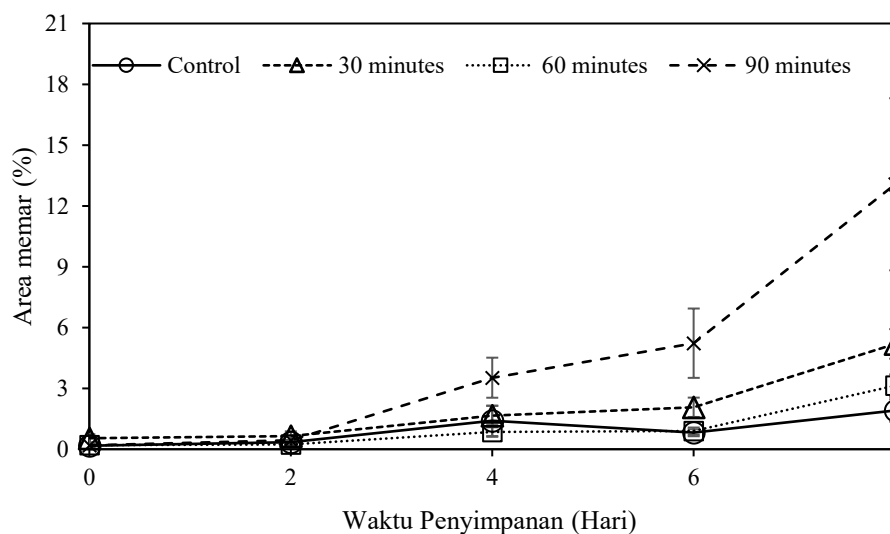
Tabel 1. Hasil analisis PCA

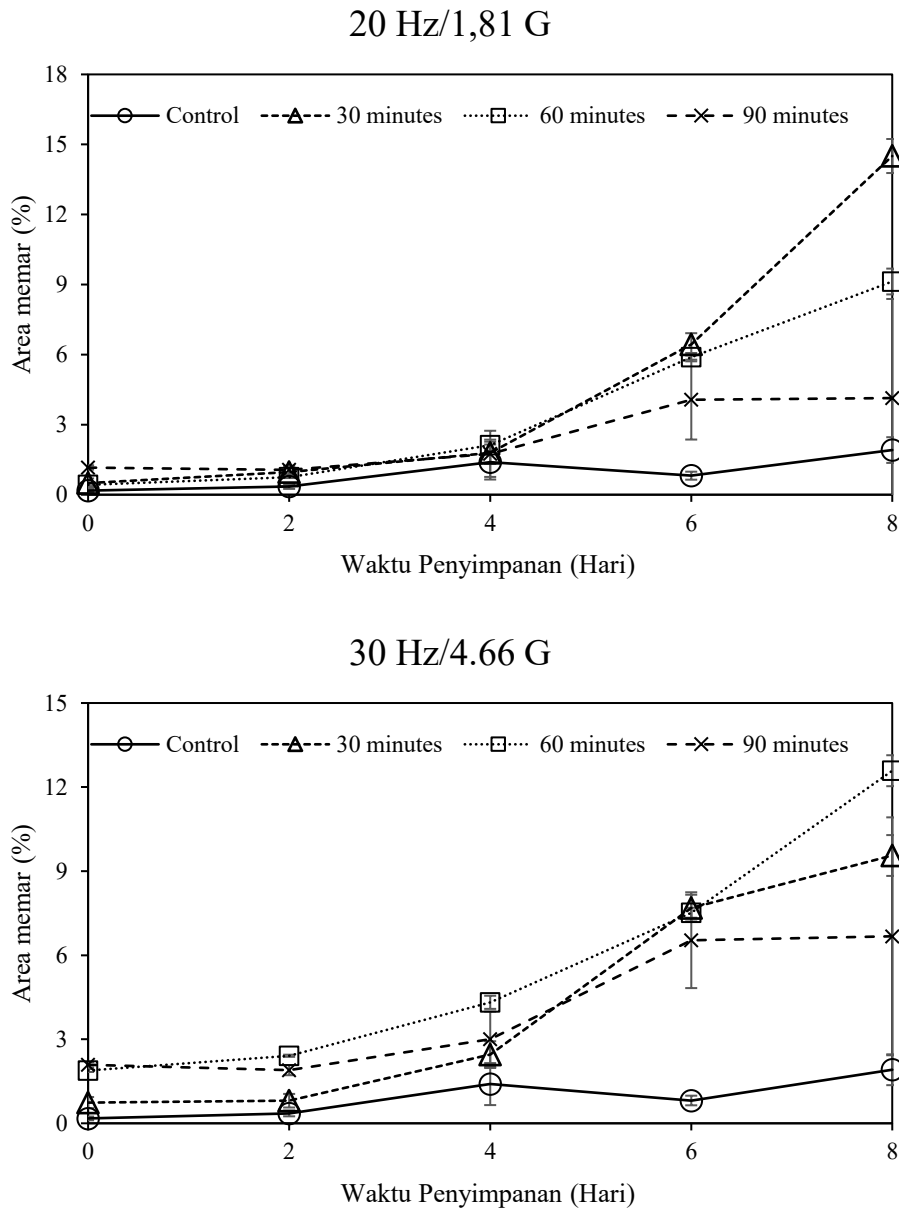
Komponen	<i>Eigenvalue</i>	% Variance	Kumulatif %
PC1	4,831	96,32	96,32
PC2	0,171	3,41	99,73
PC3	0,012	0,25	99,98
PC4	0,001	0,02	100,00
PC5	0,000	0,00	100,00

Berdasarkan kombinasi hasil PCA dan pertimbangan metodologis pengolahan citra, *threshold* 140 dan 150 merupakan kandidat yang paling rasional untuk dipilih sebagai *threshold* representatif. Kedua *threshold* tersebut berada pada rentang tengah sehingga secara teoritis memiliki peluang lebih baik untuk menyeimbangkan dua risiko segmentasi, yaitu *under-segmentation* pada *threshold* yang terlalu rendah dan *over-segmentation* pada *threshold* yang terlalu tinggi. *Threshold* yang terlalu rendah dapat menyebabkan sebagian area memar tidak terdeteksi, sedangkan *threshold* yang terlalu tinggi berisiko memasukkan area non-memar, bayangan, atau *noise* sebagai bagian dari memar. Karena nilai *loading* T140 (0,455) merupakan yang tertinggi, *threshold* ini secara statistik sedikit lebih representatif dibanding *threshold* lainnya. Namun, karena perbedaan *loading* antar-*threshold* sangat kecil, keputusan akhir lebih tepat ditetapkan berdasarkan evaluasi visual hasil segmentasi. Apabila hasil segmentasi pada *threshold* 140 menunjukkan batas memar yang lebih sesuai dengan kondisi nyata buah, maka *threshold* 140 dapat dipilih sebagai *threshold* utama. Sebaliknya, jika *threshold* 150 memberikan area segmentasi yang lebih stabil, lebih utuh, dan lebih sedikit *noise*, maka *threshold* 150 lebih layak digunakan pada analisis lanjutan. Dengan demikian, PCA berfungsi sebagai dasar objektif untuk menunjukkan bahwa seluruh *threshold* berada pada satu dimensi informasi yang sama, sedangkan pemilihan *threshold* akhir dilakukan melalui integrasi antara hasil PCA dan validasi visual citra (Lu & Lu, 2017; Mei & Li, 2023).

3.2 Perkembangan Area Memar Selama Penyimpanan

10 Hz/0.49 G





Gambar 5. Perkembangan area kerusakan mekanis selama penyimpanan pada perbedaan nilai getaran

Hasil analisis Anova menunjukkan bahwa model yang digunakan untuk menganalisis persentase area memar pisang pada *threshold* 150 (T150) secara keseluruhan berpengaruh nyata, yang ditunjukkan oleh nilai $F = 3,025$ dengan $p = 0,003$ yang ditampilkan pada Tabel 2. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi faktor yang dimasukkan ke dalam model, yaitu frekuensi getaran, durasi getaran, dan interaksi keduanya, secara bersama-sama mampu menjelaskan variasi persentase area memar pisang. Namun demikian, nilai R^2 sebesar 0,073 menunjukkan bahwa model hanya mampu menjelaskan sekitar 7,3% keragaman data, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model atau oleh variasi alami antar buah. Nilai *Adjusted R²* sebesar 0,049 juga mengindikasikan bahwa kontribusi model terhadap keragaman data relatif kecil, sehingga meskipun secara statistik model signifikan, kekuatan penjelasannya terhadap variasi memar masih terbatas.

Tabel 2. Hasil analisis sidik ragam (Anova)

Sumber Keragaman	db	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F hitung	Pvalue
Frekuensi	2	190,632	95,316	3,008	0,051
Durasi	2	2,575	1,288	0,041	0,960
Frekuensi*Durasi	4	573,775	143,444	4,526	0,001
Error	306	9697,997	31,693		
Total	315	1.6868,098			

Secara parsial, faktor frekuensi getaran menunjukkan nilai $F = 3,008$ dengan $p = 0,051$. Nilai signifikansi ini berada sangat dekat dengan batas nyata 5%, sehingga dapat dikatakan bahwa frekuensi getaran cenderung berpengaruh terhadap persentase area memar, meskipun secara statistik belum signifikan pada taraf 5%. Dengan kata lain, perubahan tingkat frekuensi getaran memberikan kecenderungan perubahan luas area memar, tetapi pengaruh tersebut belum cukup kuat untuk dinyatakan berbeda nyata secara statistik. Kondisi ini dapat disebabkan oleh variasi respons antar buah yang cukup besar, sehingga perbedaan akibat frekuensi belum sepenuhnya terpisah dari galat percobaan. Dalam konteks fisiologi pascapanen, frekuensi getaran yang lebih tinggi secara teoritis dapat meningkatkan peluang terjadinya benturan antar buah maupun antara buah dengan dinding kemasan, yang pada akhirnya memperbesar kerusakan mekanis dan memicu pembentukan memar. Namun, pada data ini pengaruh tersebut tampaknya belum konsisten di seluruh kombinasi perlakuan.

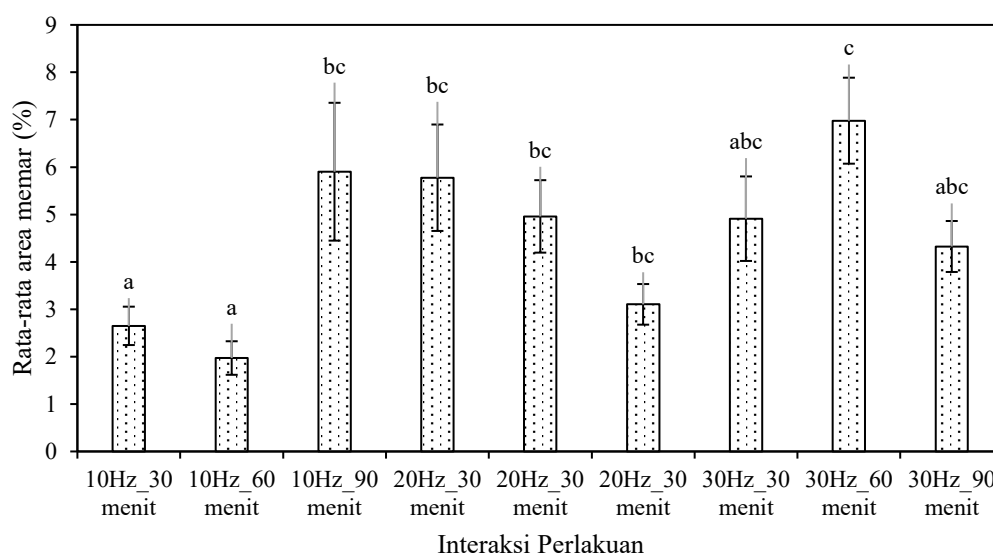
Faktor durasi getaran menunjukkan nilai $F = 0,041$ dengan $p = 0,960$ yang berarti tidak berpengaruh nyata terhadap persentase area memar T150. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan lama pemberian getaran pada taraf durasi yang diuji belum menghasilkan perbedaan luas area memar yang berarti secara statistik. Dengan demikian, jika durasi dilihat sebagai faktor tunggal, peningkatan lama getaran tidak selalu diikuti oleh peningkatan area memar. Kemungkinan hal ini terjadi karena respons memar tidak hanya dipengaruhi oleh lamanya getaran, tetapi lebih dipengaruhi oleh kombinasi antara intensitas getaran, kondisi fisik buah, posisi buah dalam kemasan, dan tingkat kematangan buah selama penyimpanan. Oleh karena itu, durasi getaran secara tunggal belum mampu menjelaskan variasi memar pada pisang dalam penelitian ini.

Berbeda dengan kedua efek utama tersebut, interaksi antara frekuensi getaran dan durasi getaran menunjukkan hasil yang berpengaruh sangat nyata, dengan nilai $F = 4,526$ dan $p = 0,001$. Hasil ini merupakan temuan penting, karena menunjukkan bahwa pengaruh frekuensi getaran terhadap persentase area memar bergantung pada durasi getaran yang diberikan, demikian pula sebaliknya. Dengan kata lain, efek frekuensi tidak dapat diinterpretasikan secara terpisah tanpa mempertimbangkan durasi, karena kombinasi tertentu antara frekuensi dan durasi dapat menghasilkan tingkat memar yang berbeda dibanding kombinasi lainnya. Sebagai contoh, frekuensi tertentu mungkin belum menimbulkan memar yang besar pada durasi singkat, tetapi dapat meningkatkan luas memar secara nyata pada durasi yang lebih lama. Sebaliknya, pada frekuensi yang lebih rendah, penambahan durasi mungkin tidak memberikan perubahan memar yang berarti. Adanya interaksi yang signifikan ini menunjukkan bahwa mekanisme pembentukan memar pada pisang selama simulasi transportasi bersifat kompleks dan dipengaruhi oleh kombinasi perlakuan, bukan hanya oleh satu faktor tunggal.

Secara umum, hasil ini mengindikasikan bahwa respon memar pisang pada *threshold* 150 lebih dipengaruhi oleh kombinasi frekuensi dan durasi getaran dibandingkan oleh durasi secara tunggal, sementara frekuensi menunjukkan kecenderungan pengaruh yang mendekati signifikan. Oleh sebab itu, pembahasan hasil penelitian sebaiknya tidak hanya berfokus pada efek utama masing-masing faktor, tetapi terutama pada pola interaksi antara frekuensi dan durasi. Dengan adanya

interaksi yang nyata, interpretasi biologis dan teknis menjadi lebih relevan apabila dilakukan melalui perbandingan rerata pada setiap kombinasi perlakuan, misalnya dengan menelaah kombinasi frekuensi–durasi mana yang menghasilkan persentase area memar tertinggi dan terendah. Pendekatan ini akan memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kondisi getaran yang paling berisiko terhadap kerusakan mekanis buah pisang selama transportasi dan penyimpanan.

Hasil uji lanjut Duncan (Gambar 6) pada variabel persentase area memar *threshold* 150 (T150) menunjukkan bahwa interaksi antara frekuensi getaran dan durasi getaran membentuk tiga subset homogen, yang menandakan bahwa kombinasi perlakuan memberikan respons memar yang berbeda-beda. Kombinasi F10D60 menghasilkan rerata persentase area memar paling rendah, yaitu 1,9713%, diikuti oleh F10D30 sebesar 2,6501% dan F20D90 sebesar 3,1037%. Sebaliknya, kombinasi F30D60 menunjukkan rerata persentase area memar tertinggi, yaitu 6,9786%. Pola ini memperlihatkan bahwa tingkat kerusakan mekanis pisang selama simulasi transportasi tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor tunggal, tetapi oleh kombinasi antara intensitas getaran dan lamanya paparan getaran.



Gambar 6. Hasil uji lanjut Duncan terhadap interaksi

Rendahnya persentase area memar pada kombinasi 10 Hz–60 menit menunjukkan bahwa pada frekuensi yang relatif rendah, energi getaran yang diterima buah kemungkinan belum cukup besar untuk menghasilkan benturan berulang yang signifikan antar buah atau antara buah dengan dinding kemasan. Dalam sistem transportasi hortikultura, memar terjadi ketika jaringan buah menerima gaya mekanis yang melampaui ambang elastisitasnya sehingga sel-sel di bawah epidermis mengalami kerusakan, yang kemudian tampak sebagai diskolorasi coklat atau kehitaman pada kulit buah (Hussein et al., 2020; Opara & Pathare, 2014). Getaran berfrekuensi rendah dengan durasi sedang pada penelitian ini tampaknya belum mendorong akumulasi energi benturan yang cukup besar, sehingga luas area memar yang terbentuk relatif kecil. Temuan ini sejalan dengan kajian transportasi pascapanen yang menyatakan bahwa kerusakan mekanis buah tidak hanya ditentukan oleh adanya getaran, tetapi juga oleh intensitas getaran, arah getaran, posisi buah dalam kemasan, dan sifat mekanik buah itu sendiri (Fernando et al., 2018; Opara et al., 2022).

Sebaliknya, tingginya persentase area memar pada kombinasi 30 Hz–60 menit menunjukkan bahwa frekuensi getaran yang lebih tinggi pada durasi tertentu dapat memperbesar risiko kerusakan mekanis. Secara mekanistik, peningkatan frekuensi getaran dapat meningkatkan jumlah siklus osilasi

yang diterima buah per satuan waktu, sehingga peluang terjadinya tumbukan, gesekan, dan tekanan berulang pada permukaan buah menjadi lebih besar. Apabila kondisi ini terjadi secara terus-menerus selama simulasi transportasi, jaringan buah dapat mengalami kegagalan struktural, baik berupa pecahnya dinding sel maupun kerusakan membran sel, yang kemudian memicu pencoklatan jaringan dan pembentukan memar (Hussein et al., 2020; Van Zeebroeck et al., 2007). Pada pisang, kerusakan mekanis selama transportasi sangat penting karena buah ini termasuk komoditas klimakterik yang sensitif terhadap benturan; memar tidak hanya menurunkan penampilan visual, tetapi juga dapat mempercepat respirasi, meningkatkan laju pemasakan, dan memperpendek umur simpan (Al-Dairi et al., 2024; Fernando et al., 2019).

Hasil Duncan juga memperlihatkan bahwa beberapa kombinasi perlakuan, seperti F30D90, F30D30, dan F20D60, berada pada subset yang saling tumpang tindih. Kondisi ini menunjukkan bahwa walaupun rerata persentase area memar berbeda secara numerik, beberapa kombinasi perlakuan tidak berbeda nyata secara statistik. Secara biologis, fenomena ini dapat dijelaskan oleh sifat memar buah yang sangat dipengaruhi oleh variasi internal buah, seperti tingkat kematangan, kekerasan jaringan, kadar air, ukuran buah, dan posisi buah terhadap sumber getaran selama simulasi transportasi (Hussein et al., 2020; Opara & Pathare, 2014). Dengan demikian, respons memar yang dihasilkan oleh satu kombinasi frekuensi–durasi tertentu dapat bertumpang tindih dengan kombinasi lainnya apabila energi mekanik yang diterima buah masih berada pada kisaran yang menghasilkan tingkat kerusakan yang serupa. Pada frekuensi rendah, penambahan durasi belum tentu langsung meningkatkan memar apabila amplitudo gerakan atau percepatan buah masih rendah. Sebaliknya, pada frekuensi yang lebih tinggi, durasi paparan tertentu dapat memperbesar peluang terjadinya resonansi atau penguatan transmisi getaran pada kemasan, sehingga memperparah memar (Fernando et al., 2018; Opara et al., 2022). Hal ini menjelaskan mengapa kombinasi 30 Hz–60 menit justru menghasilkan memar tertinggi, sementara 10 Hz–60 menit menghasilkan memar terendah, walaupun keduanya memiliki durasi yang sama.

Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan getaran perlu dipertimbangkan secara simultan dalam upaya menekan kerusakan mekanis pisang selama transportasi. Kombinasi 10 Hz–60 menit dapat dipandang sebagai kondisi simulasi yang relatif lebih aman karena menghasilkan memar paling rendah, sedangkan kombinasi 30 Hz–60 menit menunjukkan kondisi yang paling berisiko menimbulkan kerusakan. Informasi ini penting untuk perancangan sistem transportasi dan pengemasan pisang, karena pengendalian getaran tidak cukup dilakukan hanya dengan membatasi lama transportasi, tetapi juga perlu memperhatikan karakteristik frekuensi getaran yang diterima buah selama distribusi. Dengan demikian, hasil uji Duncan tidak hanya memperjelas kombinasi perlakuan yang berbeda nyata, tetapi juga memperkuat pemahaman bahwa kerusakan memar pada pisang merupakan respons dinamis terhadap interaksi antara intensitas dan durasi getaran selama penanganan pascapanen (Al-Dairi et al., 2024; Fernando et al., 2019; Opara et al., 2022).

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. *Screening threshold* pada nilai 120, 130, 140, 150, dan 160 menunjukkan bahwa seluruh *threshold* memiliki hubungan yang sangat kuat dalam merepresentasikan persentase area memar pisang.
2. Hasil *Principal Component Analysis* (PCA) menunjukkan bahwa *threshold* 120–160 berada pada satu dimensi informasi yang sama, sehingga seluruh *threshold* pada dasarnya mengukur fenomena yang serupa, yaitu luas area memar pisang.

3. Pemilihan *threshold* terbaik tidak hanya didasarkan pada hasil statistik PCA, tetapi juga mempertimbangkan kualitas segmentasi visual citra agar area memar dapat terdeteksi secara jelas, stabil, dan minim *noise*.
4. Interaksi antara frekuensi getaran dan durasi getaran berpengaruh sangat nyata terhadap persentase area memar pisang, yang menunjukkan bahwa tingkat memar dipengaruhi oleh kombinasi kedua perlakuan, bukan oleh satu faktor secara terpisah.
5. Hasil uji lanjut Duncan menunjukkan bahwa kombinasi frekuensi 10 Hz dan durasi 60 menit menghasilkan persentase area memar terendah, yaitu 1,9713%.
6. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa *threshold* 150 layak digunakan sebagai dasar kuantifikasi memar pisang, dan kerusakan memar selama simulasi transportasi dipengaruhi secara nyata oleh interaksi frekuensi dan durasi getaran.

Daftar Pustaka

- Abd, B. A., Alrawi, A. T. H., & Bassel, A. (2023). Optimization methods for image thresholding: A review. *Journal of University of Anbar for Pure Science*. <https://doi.org/10.37652/juaps.2023.178875>.
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., & Al-Yahyai, R. (2024). Evaluation of chemical quality attributes in bruised bananas during storage. *LWT*, 115904. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.115904>.
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., & Opara, U. L. (2022). Mechanical damage of fresh produce in postharvest transportation: Current status and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 124, 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.018>
- Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., Jayasuriya, H., & Al-Attabi, Z. (2021). Postharvest quality, technologies, and strategies to reduce losses along the supply chain of banana: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 177–191. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.03.003>.
- Du, Z., Zeng, X., Li, X., Ding, X., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.024>.
- Fernando, I., Fei, J., & Stanley, R. (2018). Measurement and evaluation of the effect of vibration on fruits in transit: A review. *Packaging Technology and Science*, 31(11), 723–738. <https://doi.org/10.1002/pts.2409>.
- Fernando, I., Fei, J., Stanley, R., Enshaei, H., & Eyles, A. (2019). Measurement and analysis of vibration and mechanical damage to bananas during long-distance interstate transport by multi-trailer road trains. *Postharvest Biology and Technology*, 158, 110977. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110977>.
- Hussein, Z., Fawole, O. A., & Opara, U. L. (2020). Harvest and postharvest factors affecting bruise damage of fresh fruits. *Horticultural Plant Journal*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2019.07.006>
- Lu, Y., & Lu, R. (2017). Histogram-based athresholdiutomatic ng for bruise detection of apples by structured-illumination reflectance imaging. *Biosystems Engineering*, 160, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.005>.
- Mei, M., & Li, J. (2023). An overview on optical non-destructive detection of bruises in fruit: Technology, method, application, challenge and trend. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108195. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108195>.
- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>.

- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2024). Bruise Damage Susceptibility of Banana. In *Mechanical Damage in Fresh Horticultural Produce: Measurement, Analysis and Control* (pp. 289-309). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7096-4_14.
- Pathare, P. B., Al-Dairi, M., & Al-Yahyai, R. (2022). Effect of mechanical damage on the quality characteristics of banana fruits during storage. *Discover Food*, 2(4), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s44187-022-00007-7>.
- Petrellis, N. (2018). A review of image processing techniques common in human and plant disease diagnosis. *Symmetry*, 10(7), 270. <https://doi.org/10.3390/sym10070270>.
- Sugianti, C., Imaizumi, T., Thammawong, M., & Nakano, K. (2022). Recent postharvest technologies in the banana supply chain. *Reviews in Agricultural Science*, 10, 123–137. https://doi.org/10.7831/ras.10.0_123.
- Sugianti, C., Imaizumi, T., Thammawong, M., Tsuta, M., Nagata, M., & Nakano, K. (2024). Time–temperature tolerance of harvested green bananas exposed to high temperatures. *Scientia Horticulturae*, 329, 112970. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112970>.
- Ünal, Z. (2024). Image preprocessing techniques applied on NIR images for fruit bruise detection. *BIO Web of Conferences*, 85, 01028. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248501028>.
- Van Zeebroeck, M., Van Linden, V., Darius, P., De Ketelaere, B., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2007). Impact damage of apples during transport and handling. *Postharvest Biology and Technology*, 45(2), 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.01.015>.