p-ISSN:
e-ISSN:
NEI Volume 1 No 1 Mei 2026
NUSANTARA ENGINEERING INSIGHT
Engineering and Agroindustry Journal
Journal Homepage: nrri-journal.com/index.php/nei-j

Pemodelan Matematis Gaya Lepas Buah (*Fruit Removal Force*) untuk Optimalisasi Selektivitas Pemanenan Mekanis Buah Kopi

(*Mathematical Modeling of Fruit Removal Force for Optimizing Selectivity of Mechanical Harvesting of Coffee Cherry*)

Muhammad Taufiq[1*], Siswoyo Soekarno[2], Tasliman[3], Ahmad Mutafakkir Alam[4], Tri Yaninta Ginting[5]
[1] Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Indonesia. taufiqmuhammad@unej.ac.id
[2] Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Indonesia. siswoyo.s@unej.ac.id
[3] Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Indonesia. tasliman.ftp@unej.ac.id
[4] Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember, Indonesia. aalam@unej.ac.id
[5] Jurusan Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia. triyanintaginting@dosen.pancabudi.ac.id
* Corresponding Author: taufiqmuhammad@unej.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:
Received 12 April, 2026
Revised 25 April, 2026
Accepted 12 Mei, 2026
Available online 20 Mei, 2026

Kata Kunci: fruit removal force; fruit detachment force; Coffea canephora; selective harvesting; mathematical modeling; mechanical harvesting

This is an open access article under the CC BY-SA license. Copyright © 2025 by Author. Published by Nusantara Engineering Insight

A B S T R A K

Robusta coffee harvesting requires selective detachment strategies because cherries on the same branch often occur at different ripening stages. This study developed a mathematical model of fruit removal force (FRF), also known as fruit detachment force (FDF), using observed Robusta coffee cherries from Pakis Village, Sukorambi, Jember. Five coffee plants were evaluated, and mean FRF and fruit mass were tabulated for red, orange, and green cherries. The empirical maturity-index model showed that FRF increased consistently from red cherries (3.532 N) to orange cherries (5.966 N) and green cherries (8.034 N). A quadratic maturity model, $FRF = 0.732 + 2.983M - 0.183M^2$, achieved high goodness of fit ($R^2 = 0.9996$; RMSE = 0.036 N), indicating that fruit color can serve as a practical predictor of detachment resistance. Dynamic simulation using $F = m(2\pi f)^{2A}$ suggested that, at 2.0 mm vibration amplitude, the critical frequency for red cherries was approximately 122.32 Hz, while orange and green cherries required 159.13 Hz and 185.28 Hz. The optimum selective harvesting window was therefore estimated at 3.6–5.8 N or approximately 122–150 Hz at 2.0 mm amplitude. The model provides a quantitative basis for setting vibration-based selective coffee harvesters.

1. PENDAHULUAN

Kopi robusta (*Coffea canephora*) merupakan komoditas perkebunan penting di Indonesia karena berperan sebagai sumber pendapatan petani, bahan baku industri, dan komoditas ekspor. Publikasi Statistik Kopi Indonesia menyajikan data luas areal, produksi, ekspor, dan impor kopi sebagai bagian dari statistik perkebunan nasional, sehingga kopi tetap menjadi komoditas strategis dalam sistem pertanian Indonesia (BPS, 2024). Publikasi Statistik Tanaman Perkebunan Tahunan Indonesia 2024 juga menempatkan kopi sebagai salah satu komoditas perkebunan unggulan yang dipantau secara nasional bersama kelapa sawit, kakao, karet, dan teh (BPS, 2025). Produktivitas kopi robusta di tingkat kebun masih sangat dipengaruhi oleh keragaman bahan tanam, kondisi lingkungan, teknik budidaya, dan mutu penanganan panen sampai

pascapanen (Bizimungu *et al*., 2022; Meliala *et al*., 2024).

Teknik pemanenan kopi yang tidak memperhatikan tingkat kematangan buah dapat menurunkan mutu bahan baku karena buah merah, oranye, hijau, dan bahkan buah kering tercampur dalam satu proses panen. Campuran buah dengan tingkat kematangan berbeda dapat memengaruhi sifat fisik, kimia, serta kualitas sensori kopi karena prekursor rasa dan aroma berkembang tidak seragam selama proses pemasakan buah (Buitrago-Osorio *et al*., 2022; Meliala *et al*., 2024). Pemanenan manual selektif masih menjadi metode yang paling akurat untuk memperoleh buah matang, tetapi kebutuhan tenaga kerja, waktu, dan biaya operasional sering menjadi kendala pada perkebunan dengan skala luas. Mekanisasi pemanenan diperlukan untuk meningkatkan kapasitas kerja, tetapi rancangan mesin harus diarahkan pada prinsip selektivitas agar buah matang dapat dilepaskan tanpa banyak menjatuhkan buah mentah (Pu *et al*., 2023; Meneses *et al*., 2024).

Tingkat kematangan buah kopi memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik fisik dan mekanis buah, termasuk massa, dimensi, kekerasan, elastisitas jaringan, dan kekuatan ikatan buah dengan tangkai. Buah hijau umumnya memiliki ikatan pedisel yang lebih kuat, sedangkan buah merah cenderung lebih mudah terlepas karena perubahan fisiologis pada zona absisi selama pemasakan (Buitrago-Osorio *et al*., 2022; Santin *et al*., 2023). Dinamika fruit removal force (FRF) atau fruit detachment force (FDF) pada setiap tingkat kematangan menjadi informasi penting untuk menentukan strategi panen yang efisien dan mengurangi kehilangan hasil. Informasi tersebut dapat digunakan untuk menetapkan ambang gaya, frekuensi getaran, dan amplitudo kerja mesin agar pelepasan buah matang lebih dominan dibandingkan buah mentah (Villibor *et al*., 2023; Zhou *et al*., 2025).

Pengukuran FRF dapat dilakukan menggunakan digital tensile push-pull meter atau dinamometer portabel untuk memperoleh data gaya tarik dalam satuan Newton (N). Prinsip pengukuran dilakukan dengan menarik buah searah atau mendekati arah sumbu pedisel sampai buah terlepas dari tangkainya, kemudian nilai puncak gaya dicatat sebagai gaya lepas buah. Metode berbasis gaya tarik langsung telah digunakan dalam kajian karakterisasi mekanis buah kopi karena sederhana, mudah diterapkan di lapangan, dan memberikan data yang relevan untuk pengaturan mesin pemanen (Ferreira Júnior *et al*., 2018; Santin *et al*., 2023). Data gaya lepas akan lebih informatif bila dipadukan dengan massa buah, karena rasio gaya terhadap massa dapat mengindikasikan kebutuhan percepatan mekanis minimum untuk proses pelepasan buah secara dinamis.

Pemodelan matematis berdasarkan data FRF dapat mengubah hasil pengamatan lapangan menjadi persamaan prediktif yang dapat digunakan untuk simulasi teknik pemanenan. Model empiris dapat menjelaskan hubungan antara tingkat kematangan dan gaya lepas buah, sedangkan model dinamis dapat menghubungkan gaya lepas dengan parameter mesin seperti massa buah, amplitudo getaran, dan frekuensi eksitasi. Persamaan sederhana F = m(2πf)^2A dapat digunakan sebagai pendekatan awal untuk mengestimasi frekuensi kritis ketika gaya inersia buah setara atau melampaui FRF. Pendekatan matematis seperti ini penting karena rancangan pemanen selektif memerlukan jendela operasi yang cukup kuat untuk melepaskan buah merah, tetapi tidak melebihi ambang gaya buah oranye dan hijau (Gomes *et al*., 2020; Villibor *et al*., 2023).

Tujuan penelitian ini adalah menyusun model matematis gaya lepas buah kopi robusta berdasarkan data FRF pada tiga kategori warna buah, yaitu merah, oranye, dan hijau. Penelitian ini juga bertujuan menghitung rasio FRF terhadap massa buah sebagai dasar analisis selektivitas mekanis. Tujuan berikutnya adalah mensimulasikan respons frekuensi dan amplitudo getaran untuk mengidentifikasi jendela gaya serta frekuensi optimum bagi mesin pemanen kopi selektif. Hasil pemodelan diharapkan dapat menjadi dasar awal pengaturan parameter mesin pemanen kopi robusta di Desa Pakis, Sukorambi, Jember, khususnya untuk meningkatkan efisiensi panen dan menekan rontoknya buah mentah.

2. METODE

2.1. Pengamatan FRF

Penelitian menggunakan data pengamatan Fruit Removal Force (FRF) buah kopi robusta di Desa Pakis, Kecamatan Sukorambi, Kabupaten Jember. Data yang dianalisis memuat lima tanaman kopi yang dipilih secara acak sebagai ulangan tanaman, sesuai dengan tabel pengamatan yang tersedia. Pada setiap tanaman, buah kopi dikelompokkan ke dalam tiga warna kematangan, yaitu merah, oranye, dan hijau. Nilai yang digunakan dalam pemodelan merupakan rerata FRF dan rerata massa buah untuk setiap kombinasi tanaman dan warna buah.

Pengukuran FRF dilakukan sebagai pengukuran langsung terhadap gaya pelepasan buah kopi dari tangkainya. Setiap buah ditarik menggunakan alat ukur gaya tipe digital tensile push-pull meter sampai buah terlepas dari pedisel. Satuan gaya dinyatakan dalam Newton (N), sedangkan massa buah dinyatakan dalam kilogram (kg). Data FRF dan massa kemudian digunakan untuk menghitung rasio gaya terhadap massa sebagai indikator kebutuhan percepatan mekanis pada proses pelepasan buah.

Rancangan pengamatan pada tingkat tanaman diperlakukan sebagai ulangan lapangan untuk memperoleh gambaran variasi FRF antar tanaman. Setiap kategori warna diasumsikan mewakili tingkat kematangan fisiologis yang berbeda. Buah merah diperlakukan sebagai buah matang yang menjadi target utama pemanenan selektif, buah oranye diperlakukan sebagai buah transisi, dan buah hijau diperlakukan sebagai buah mentah yang sebaiknya tetap tertahan di tanaman. Struktur data ini memungkinkan pengembangan model matematis berbasis indeks kematangan dan simulasi selektivitas berdasarkan ambang gaya.

2.2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk menjelaskan fenomena nyata yang dimodelkan, yaitu hubungan antara tingkat kematangan buah, gaya lepas buah, dan parameter pemanenan mekanis. Literatur terbaru menunjukkan bahwa karakteristik fisik dan mekanis buah kopi berubah selama proses pemasakan, sehingga data warna buah dapat digunakan sebagai indikator awal untuk memisahkan kategori kematangan (Buitrago-Osorio *et al*., 2022; Costa *et al*., 2020). Fenomena tersebut penting karena buah pada satu cabang kopi sering matang tidak serempak, sehingga pemanenan mekanis tanpa selektivitas dapat mencampurkan buah merah dan hijau. Kajian pustaka juga menegaskan bahwa FRF merupakan variabel kunci untuk menentukan waktu panen dan pengaturan mesin pemanen kopi (Santin *et al*., 2023; Meneses *et al*., 2024).

Sistem nyata yang dimodelkan dapat dipahami sebagai rangkaian buah-tangkai-cabang yang menerima gaya tarik atau gaya inersia akibat getaran mesin. Pada kondisi statis, buah terlepas ketika gaya tarik yang diterima pedisel melebihi nilai FRF. Pada kondisi dinamis, gaya pelepasan dapat dihasilkan oleh percepatan buah akibat getaran harmonik dari batang penggetar atau lengan pemanen. Vibration transmissibility pada sistem buah-pedisel-cabang telah digunakan untuk memahami rentang frekuensi dan amplitudo yang paling efektif dalam mentransfer energi mekanis ke buah kopi (Gomes *et al*., 2020; Villibor *et al*., 2023).

Diagram alur sistem dalam penelitian ini dimulai dari pengukuran FRF dan massa buah, pengkodean tingkat kematangan berdasarkan warna, pembentukan model empiris FRF, simulasi gaya dinamis akibat getaran, validasi model terhadap data pengamatan, dan penentuan jendela gaya optimum (Gambar 1). Alur ini sejalan dengan pendekatan rekayasa pertanian modern yang menggunakan data sifat mekanis komoditas untuk merancang mesin panen yang lebih efisien dan selektif. Studi tentang mekanisasi pemanenan buah juga menekankan bahwa frekuensi, amplitudo, arah gaya, serta kondisi cabang menentukan keberhasilan pelepasan buah dan potensi kerusakan tanaman (Pu *et al*., 2023; Pereira *et al*., 2025). Kerangka literatur tersebut digunakan sebagai dasar untuk menyederhanakan sistem kopi robusta lapangan menjadi model matematis yang dapat dihitung dan diuji dengan data FRF.



Gambar 1. Diagram alur pemodelan matematis FRF buah kopi

2.3. Asumsi dan Batasan

Model disusun dengan beberapa asumsi agar sistem pelepasan buah dapat direpresentasikan secara matematis. Tingkat kematangan direduksi menjadi tiga kategori warna, yaitu merah, oranye, dan hijau, karena warna merupakan indikator praktis yang mudah diamati di lapangan. Setiap kategori warna diasumsikan memiliki nilai rerata FRF dan massa yang mewakili kondisi mekanis buah pada kategori tersebut. Perbedaan posisi buah pada cabang, sudut tarik, kelembapan jaringan, dan kondisi mikroklimat tidak dimasukkan sebagai variabel eksplisit karena data pengamatan yang tersedia berupa rerata per tanaman dan warna.

$$F = m \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot A \qquad (1)$$

Model dinamis menggunakan pendekatan getaran harmonik sederhana dengan gaya inersia yang ditampilkan oleh persamaan (1). Dimana, F adalah gaya inersia (N), m adalah massa benda atau sistem (kg), f adalah frekuensi getaran (Hz), dan A adalah amplitudo getaran (m). Pendekatan ini mengasumsikan bahwa massa buah berperan sebagai massa terpusat, amplitudo getaran konstan, dan arah gaya efektif sejajar dengan arah pelepasan buah. Redaman pedisel, kelenturan cabang, interaksi antar buah dalam dompolan, serta variasi kontak batang penggetar tidak dimodelkan secara rinci. Penyederhanaan ini umum digunakan sebagai pendekatan awal dalam analisis sistem buah-pedisel sebelum pengembangan model elemen hingga atau uji getaran lapangan yang lebih kompleks (Gomes *et al*., 2020; Villibor *et al*., 2023).

Batasan ruang lingkup model terletak pada penggunaan data FRF rerata untuk lima tanaman di satu lokasi, sehingga hasilnya lebih tepat dipahami sebagai model awal untuk kondisi kopi robusta di Desa Pakis, Sukorambi, Jember. Model belum mencakup variasi varietas, umur tanaman, musim, posisi kanopi, diameter tangkai, dan kadar air buah secara terukur. Simulasi selektivitas juga menggunakan distribusi normal berbasis variasi antar tanaman, bukan distribusi individu buah yang lengkap. Validasi lanjutan tetap diperlukan melalui uji pemanenan mekanis aktual pada beberapa frekuensi, amplitudo, dan durasi getaran untuk memastikan bahwa hasil simulasi sesuai dengan performa lapangan (Meneses *et al*., 2024; Zhou *et al*., 2025).

2.4. Formulasi Model, Variabel dan Parameter

Variabel bebas utama dalam model empiris adalah indeks kematangan buah (M), dengan nilai M = 1 untuk buah merah, M = 2 untuk buah oranye, dan M = 3 untuk buah hijau. Variabel terikat utama adalah FRF dalam satuan Newton. Massa buah (m) dalam satuan kilogram digunakan sebagai parameter dinamis untuk menghubungkan gaya pelepasan dengan frekuensi dan amplitudo getaran. Rasio FRF/massa dihitung untuk menunjukkan kebutuhan percepatan minimum pada setiap kategori warna buah.

Model empiris dirumuskan menggunakan persamaan kuadratik berbasis indeks kematangan (persamaan 2), yaitu:

$$FRF(M) = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 M^2 + \varepsilon \qquad (2)$$

Bentuk kuadratik dipilih karena data memiliki tiga tingkat kematangan dan menunjukkan peningkatan FRF yang tidak sepenuhnya linier dari merah ke hijau. Hasil pemodelan menghasilkan persamaan (3) sebagai berikut:

$$FRF(M) = 0{,}732 + 2{,}983M + 0{,}183M^2 + \varepsilon \qquad (3)$$

Persamaan tersebut memberikan estimasi FRF 3,532 N untuk buah merah, 5,966 N untuk buah oranye, dan 8,034 N untuk buah hijau.

$$F_{dyn} = m \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot A \qquad (4)$$

Model dinamis pelepasan buah dirumuskan dengan gaya inersia harmonik

sebagaimana persamaan (4) yang menunjukkan bahwa parameter f merupakan frekuensi getaran dalam Hertz, sedangkan A menunjukkan amplitudo getaran dalam meter. Oleh karena itu frekuensi kritis untuk pelepasan buah dihitung dengan menyusun ulang persamaan menjadi persamaan (5) berikut:

$$F_{krit} = \left(\frac{1}{2}\pi\right) \cdot \sqrt{\frac{FRF}{(m \cdot A)}} \qquad (5)$$

Buah diprediksi terlepas ketika F_{dyn} sama dengan atau lebih besar daripada FRF, sehingga kombinasi f dan A dapat digunakan untuk menentukan batas operasi mesin pemanen selektif.

2.5. Analisis Metode Penyelesaian

Analisis dilakukan secara deskriptif, empiris, dan simulatif. Statistik deskriptif digunakan untuk menghitung rerata, simpangan baku, koefisien variasi, nilai minimum, dan nilai maksimum FRF pada setiap warna buah. Rasio FRF/massa dihitung sebagai besaran turunan untuk membandingkan kebutuhan gaya relatif terhadap bobot buah. Hasil statistik dasar menjadi input utama untuk membangun model FRF dan menyusun ambang selektivitas.

Penyelesaian model empiris dilakukan menggunakan curve-fitting berbasis regresi kuadratik terhadap indeks kematangan. Akurasi model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), dan leave-one-out cross-validation RMSE. Statistik galat tersebut dipilih karena dapat menunjukkan kedekatan model dengan data pengamatan dan stabilitas prediksi pada data yang relatif kecil. Pendekatan berbasis regresi sering digunakan dalam pemodelan awal sifat mekanis komoditas pertanian karena mudah ditafsirkan dan dapat langsung dikaitkan dengan parameter teknik (Jakob *et al*., 2021; Pu *et al*., 2023).

Simulasi komputasi dilakukan dengan menghitung frekuensi kritis pada tiga nilai amplitudo, yaitu 1,5 mm, 2,0 mm, dan 2,5 mm. Rentang amplitudo tersebut dipilih sebagai skenario teknis untuk menggambarkan pengaruh perubahan simpangan getaran terhadap gaya inersia buah. Simulasi selektivitas dilakukan dengan membandingkan berbagai ambang gaya mekanis terhadap distribusi FRF merah, oranye, dan hijau. Nilai ambang terbaik dipilih ketika prediksi buah merah rontok mendekati maksimum, sedangkan buah oranye dan hijau tetap minimum.

2.6. Validasi dan Kalibrasi Model

Validasi model dilakukan dengan membandingkan nilai FRF prediksi terhadap nilai FRF aktual pada setiap kombinasi tanaman dan warna buah. Kesesuaian model dinilai dari selisih prediksi dan pengamatan, sehingga galat model dapat diketahui secara kuantitatif. Model dianggap layak sebagai model awal apabila R^2 tinggi dan nilai RMSE jauh lebih kecil dibandingkan perbedaan rerata FRF antar tingkat kematangan. Prinsip ini penting karena tujuan model bukan hanya menjelaskan data, tetapi juga membedakan zona gaya untuk pemanenan selektif.

Kalibrasi model dilakukan dengan menyesuaikan koefisien β_0, β_1, dan β_2 pada persamaan kuadratik agar rerata FRF tiap tingkat kematangan terwakili secara akurat. Kalibrasi dinamis dilakukan dengan memasukkan rerata massa buah ke dalam persamaan frekuensi kritis. Perubahan nilai amplitudo kemudian digunakan untuk melihat sensitivitas frekuensi terhadap parameter mesin. Kalibrasi semacam ini membantu menerjemahkan data mekanis buah menjadi rekomendasi frekuensi, amplitudo, dan ambang gaya yang dapat diuji pada alat pemanen.

Keandalan model tetap dibatasi oleh ukuran data dan karakter pengamatan yang berupa rerata per tanaman. Model akan lebih kuat apabila data individu buah tersedia, sehingga distribusi FRF nyata pada setiap warna dapat dihitung dengan lebih tepat. Validasi lapangan juga diperlukan dengan menguji mesin pada beberapa kombinasi frekuensi dan amplitudo untuk mencatat persentase buah merah, oranye, dan hijau yang rontok. Tahap validasi lanjutan ini sejalan dengan pengembangan pemanen selektif yang menggabungkan data sifat mekanis, getaran, dan performa aktual mesin di lapangan (Villibor *et al*., 2023; Meneses *et al*., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Fisik dan Mekanis Buah Kopi

Data dasar menunjukkan bahwa nilai FRF meningkat seiring perubahan warna dari merah ke oranye dan hijau (Tabel 1-2). Buah merah memiliki rerata FRF 3,532 N, buah oranye 5,966 N, dan buah hijau 8,034 N (Gambar 2). Pola ini menunjukkan bahwa buah matang lebih mudah dilepaskan dari tangkai dibandingkan buah transisi dan buah mentah. Hasil tersebut selaras dengan konsep bahwa ikatan buah dengan pedisel melemah selama pemasakan, sehingga gaya yang diperlukan untuk melepaskan buah matang menjadi lebih rendah (Buitrago-Osorio *et al*., 2022; Santin *et al*., 2023).

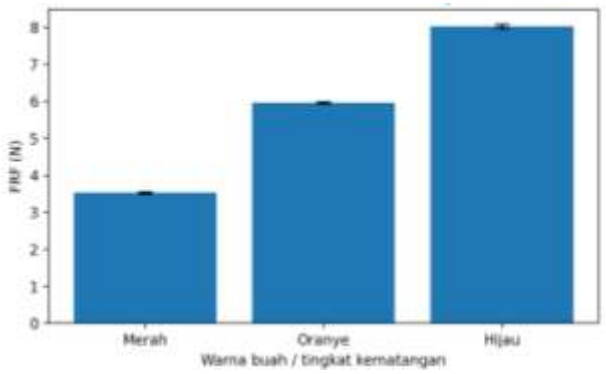
Massa buah antar kategori relatif berdekatan, yaitu sekitar 0,003 kg, tetapi rasio FRF terhadap massa berbeda tajam. Buah merah memiliki rasio sekitar 1181,67 N kg^{-1}, buah oranye 2002,06 N kg^{-1}, dan buah hijau 2718,75 N kg^{-1}. Perbedaan rasio ini menunjukkan bahwa selektivitas mekanis lebih banyak ditentukan oleh perbedaan kekuatan ikatan tangkai daripada perbedaan massa buah. Rasio yang lebih rendah pada buah merah berarti buah matang membutuhkan percepatan mekanis lebih kecil untuk rontok, sehingga kategori ini menjadi target utama mesin pemanen selektif.

Tabel 1. ANOVA *single factor* buah kopi warna merah

Tanaman	Warna buah	FRF (N)	Massa (kg)	FRF/massa (N kg^{-1})
	Merah	3,47	0,0030	1149,01
1	Oranye	5,96	0,0032	1874,21
	Hijau	8,03	0,0032	2525,16
	Merah	3,54	0,0030	1183,95
2	Oranye	5,93	0,0029	2051,90
	Hijau	8,01	0,0028	2860,71
	Merah	3,56	0,0029	1227,59
3	Oranye	5,96	0,0029	2034,13
	Hijau	8,13	0,0029	2765,31
	Merah	3,56	0,0031	1167,21
4	Oranye	5,96	0,0030	1966,99
	Hijau	7,98	0,0031	2557,69
	Merah	3,53	0,0030	1180,60
5	Oranye	6,02	0,0029	2083,05
	Hijau	8,02	0,0028	2884,89

Tabel 2. Ringkasan karakteristik fisik dan mekanis buah kopi robusta

Warna	n	Rerata FRF (N)	SD FRF	CV FRF (%)	Min FRF	Maks FRF	Rerata massa (kg)	Rerata FRF / massa
Merah	5	3,53	0,04	1,05	3,47	3,56	0,003	1181,67
Oranye	5	5,97	0,03	0,55	5,93	6,02	0,003	2002,06
Hijau	5	8,03	0,06	0,71	7,98	8,13	0,003	2718,75



Gambar 2. Perbedaan rerata FRF pada tiga warna buah kopi robusta

3.2. Validasi dan Keandalan Model Matematis FRF Buah Kopi

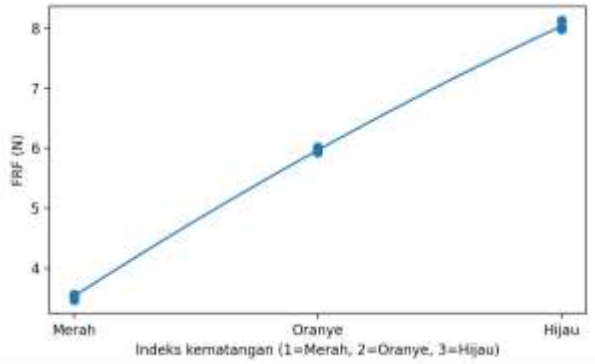
Model kuadratik berbasis indeks kematangan menghasilkan persamaan $FRF(M) = 0{,}732 + 2{,}983M - 0{,}183M^2$. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan indeks kematangan dari merah menuju hijau menaikkan kebutuhan gaya lepas buah. Nilai R^2 sebesar 0,9996 menunjukkan bahwa model mampu menjelaskan hampir seluruh variasi FRF pada data pengamatan. Nilai RMSE sebesar 0,036 N dan MAE sebesar 0,030 N menunjukkan galat prediksi sangat kecil dibandingkan jarak rerata FRF merah ke oranye sebesar 2,434 N dan oranye ke hijau sebesar 2,068 N (Tabel 3).

Kesesuaian model dengan data eksperimen menunjukkan bahwa tingkat kematangan berbasis warna dapat digunakan sebagai variabel prediktor praktis untuk desain awal mesin pemanen (Gambar 3). Model ini tidak dimaksudkan sebagai model fisiologis lengkap, tetapi sebagai model empiris yang mengubah kategori warna buah menjadi estimasi gaya lepas. Nilai leave-one-out cross-validation RMSE sebesar 0,0487 N mengindikasikan bahwa model tetap stabil ketika setiap data diuji secara bergantian. Kinerja model tersebut cukup kuat untuk menentukan ambang gaya selektif, karena galat model jauh lebih kecil dibandingkan

selisih FRF antar kategori warna.

Tabel 3. Parameter validasi model matematis FRF buah kopi

Komponen	Nilai	Keterangan
Model empiris	FRF = 0,732 + 2,983M - 0,183M²	M = 1 merah; 2 oranye; 3 hijau
R^2	0,9996	Kesesuaian model terhadap data
RMSE	0,036 N	Galat kuadrat rerata
MAE	0,030 N	Galat absolut rerata
LOOCV RMSE	0,0487 N	Validasi silang leave-one-out



Gambar 3. Curve-fitting model matematis FRF terhadap data pengamatan

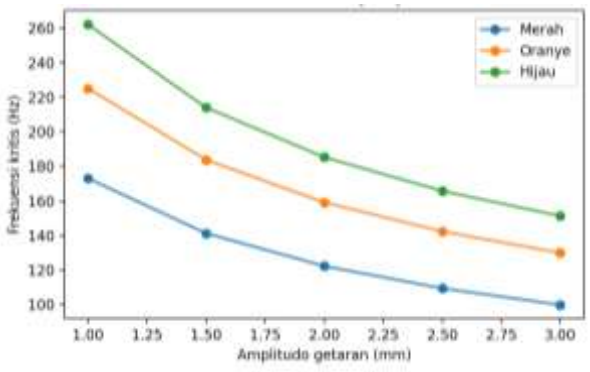
3.3. Simulasi Dinamika Pelepasan Buah (*Fruit Detachment Dynamics*)

Simulasi dinamika pelepasan buah dilakukan dengan menggunakan persamaan (4). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa gaya inersia meningkat secara kuadratik terhadap frekuensi, sehingga peningkatan frekuensi kecil dapat menghasilkan kenaikan gaya mekanis yang besar. Hasil pada Tabel 4 menjelaskan bahwa pada amplitudo 2,0 mm, frekuensi kritis pelepasan buah merah diperkirakan 122,32 Hz, sedangkan buah oranye dan hijau memerlukan frekuensi 159,13 Hz dan 185,28 Hz. Jarak frekuensi tersebut membentuk peluang selektivitas karena rentang sekitar 122–150 Hz dapat merontokkan buah merah tetapi masih berada di bawah kebutuhan kritis buah oranye dan hijau.

Perubahan amplitudo menggeser frekuensi kritis ke nilai yang lebih rendah atau lebih tinggi (Gambar 4). Pada amplitudo 1,5 mm, buah merah membutuhkan frekuensi sekitar 141,24 Hz, sedangkan pada amplitudo 2,5 mm frekuensi kritisnya turun menjadi 109,40 Hz. Hasil ini menunjukkan bahwa mesin pemanen dapat mengatur kombinasi frekuensi dan amplitudo, bukan hanya menaikkan frekuensi secara tunggal. Pengaturan amplitudo yang terlalu tinggi tetap perlu dihindari karena dapat memperbesar gaya pada cabang dan meningkatkan risiko rontoknya buah non-target atau kerusakan jaringan tanaman (Gomes *et al*., 2020; Villibor *et al*., 2023).

Tabel 4. Estimasi frekuensi kritis pelepasan buah berdasarkan amplitudo getaran

Warna	Amplitudo (mm)	Frekuensi kritis (Hz)
Merah	1.50	141.24
Merah	2.00	122.32
Merah	2.50	109.40
Oranye	1.50	183.75
Oranye	2.00	159.13
Oranye	2.50	142.33
Hijau	1.50	213.94
Hijau	2.00	185.28
Hijau	2.50	165.72



Gambar 4. Hubungan amplitudo getaran dengan frekuensi kritis pelepasan buah

3.4. Analisis Sensitivitas Parameter Model

Parameter yang paling sensitif dalam model adalah tingkat kematangan buah karena perubahan warna dari merah ke hijau meningkatkan FRF lebih dari dua kali lipat. Perubahan massa buah relatif kecil, sehingga kontribusi massa terhadap perbedaan FRF tidak sebesar kontribusi kekuatan ikatan pedisel. Nilai FRF hijau yang tinggi mengindikasikan bahwa buah mentah masih memiliki jaringan penghubung yang lebih kuat dan zona absisi yang belum berkembang sempurna. Perubahan sifat jaringan selama pemasakan, termasuk pelunakan dinding sel dan penurunan kekuatan sambungan buah-

tangkai, menjadi dasar biologis rendahnya FRF buah merah (Buitrago-Osorio *et al*., 2022; Santin *et al*., 2023).

Sensitivitas parameter mesin terutama terletak pada frekuensi dan amplitudo. Frekuensi berpengaruh kuadratik terhadap gaya dinamis, sedangkan amplitudo berpengaruh linier (Tabel 5). Artinya, kesalahan kecil dalam menaikkan frekuensi dapat menyebabkan gaya mekanis melampaui ambang buah oranye dan hijau, terutama ketika amplitudo juga tinggi. Batas atas gaya mekanis sebaiknya diletakkan di bawah FRF minimum buah oranye, sedangkan batas bawahnya sebaiknya sedikit di atas FRF maksimum buah merah agar pelepasan buah matang tetap tinggi.

Tabel 5. Sensitivitas parameter terhadap output model FRF dan selektivitas pemanenan

Parameter	Sensitivitas	Implikasi teknis
Tingkat kematangan	Sangat tinggi	FRF meningkat dari 3,532 N (merah) menjadi 8,034 N (hijau).
Massa buah	Rendah-sedang	Massa relatif serupa, tetapi tetap memengaruhi frekuensi kritis melalui gaya inersia.
Amplitudo getaran	Tinggi	Kenaikan amplitudo menurunkan frekuensi kritis dan menaikkan gaya inersia.
Frekuensi getaran	Sangat tinggi	Gaya meningkat sebanding kuadrat frekuensi, sehingga parameter ini paling kritis pada mesin.
Ambang gaya	Sangat tinggi	Ambang 3,6–5,8 N memisahkan buah merah dari oranye dan hijau.

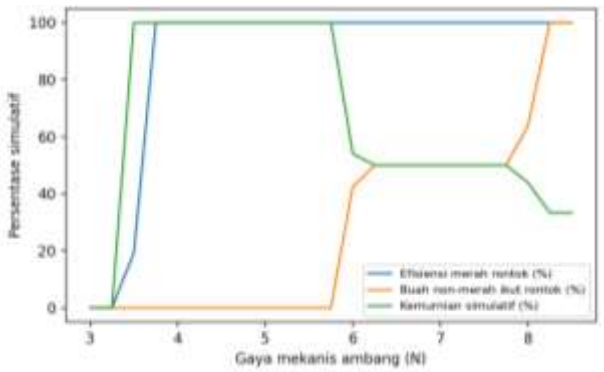
3.5. Optimalisasi Parameter Pemanenan Selektif

Jendela gaya optimum ditentukan berdasarkan batas maksimum FRF buah merah dan batas minimum FRF buah oranye. Nilai maksimum FRF buah merah dalam data adalah 3,56 N, sedangkan nilai minimum FRF buah oranye adalah 5,93 N. Jendela gaya selektif yang aman dapat diletakkan pada kisaran 3,6–5,8 N, karena rentang tersebut cukup untuk melepaskan buah merah tetapi belum mencapai ambang pelepasan buah oranye dan hijau. Rentang ini menjadi dasar pengaturan gaya jepit, gaya tarik, atau gaya inersia mesin pemanen kopi selektif.

Simulasi probabilistik menunjukkan bahwa gaya ambang 4,0–5,8 N menghasilkan prediksi rontok buah merah mendekati 100% dan prediksi rontok buah oranye serta hijau mendekati 0% pada data rerata tanaman (Tabel 6). Gaya ambang 6,0 N mulai meningkatkan peluang rontok buah oranye, sehingga kemurnian panen simulatif menurun. Hasil ini menunjukkan bahwa target pengoperasian mesin sebaiknya tidak diarahkan hanya pada gaya maksimum, tetapi pada gaya yang terletak di dalam jendela selektif. Pada amplitudo 2,0 mm, jendela tersebut setara dengan frekuensi sekitar 122–150 Hz sebagai rentang awal yang layak diuji pada prototipe pemanen (Gambar 5).

Tabel 6. Simulasi efisiensi dan kemurnian hasil panen pada berbagai gaya ambang

Gaya ambang (N)	Merah rontok (%)	Oranye rontok (%)	Hijau rontok (%)	Kemurnian simulatif (%)
3.50	19.36	0.00	0.00	100.00
4.00	100.00	0.00	0.00	100.00
5.00	100.00	0.00	0.00	100.00
5.80	100.00	0.00	0.00	100.00
6.00	100.00	84.96	0.00	54.07
7.00	100.00	100.00	0.00	50.00
8.00	100.00	100.00	27.48	43.96



Gambar 5. Simulasi selektivitas pemanenan berdasarkan variasi gaya mekanis ambang

3.6. Implikasi Praktis

Fenomena fisik utama yang menjelaskan rendahnya FRF buah merah adalah melemahnya ikatan buah dengan tangkai selama proses pematangan. Buah matang mengalami perubahan fisiologis pada jaringan

penghubung, termasuk pelunakan jaringan dan penurunan kekuatan mekanis pada zona pelepasan. Kondisi ini membuat buah merah memerlukan gaya lebih kecil untuk terlepas dibandingkan buah oranye dan hijau. Nilai FRF yang berbeda antar warna dapat dimanfaatkan sebagai dasar pemanenan selektif karena mesin dapat diarahkan untuk bekerja hanya pada ambang gaya buah matang.

Rekomendasi desain mesin dari hasil model adalah penggunaan sistem getaran dengan frekuensi dan amplitudo yang dapat diatur. Untuk kondisi data ini, amplitudo sekitar 2,0 mm dengan frekuensi awal 122–150 Hz dapat dijadikan rentang uji karena mampu mendekati kebutuhan pelepasan buah merah tanpa memasuki frekuensi kritis buah oranye. Lengan mekanis atau batang penggetar juga perlu dilengkapi kontrol durasi kontak agar energi yang masuk ke cabang tidak berlebihan. Pengujian lapangan tetap perlu dilakukan untuk menentukan pengaruh sudut kontak, posisi cabang, kepadatan dompolan, dan variasi tanaman terhadap efisiensi aktual mesin.

Penerapan model matematis ini dapat membantu petani, peneliti, dan perancang alat dalam menerjemahkan data laboratorium menjadi parameter teknik. Data FRF menyediakan batas gaya, data massa menyediakan kebutuhan percepatan, dan model dinamis menyediakan perkiraan frekuensi-amplitudo. Kombinasi ketiga informasi tersebut dapat mempercepat pengembangan mesin pemanen kopi selektif yang lebih efisien. Model juga dapat diperluas dengan memasukkan data diameter tangkai, kadar air, kekakuan pedisel, dan distribusi individu buah untuk meningkatkan akurasi rekomendasi mesin.

4. KESIMPULAN

Pemodelan matematis FRF buah kopi robusta menunjukkan bahwa tingkat kematangan memiliki hubungan kuat dengan gaya lepas buah. Buah merah memiliki FRF paling rendah dengan rerata 3,532 N, buah oranye memiliki FRF menengah sebesar 5,966 N, dan buah hijau memiliki FRF paling tinggi sebesar 8,034 N. Pola ini membuktikan bahwa buah matang lebih mudah dilepaskan dari tangkai dibandingkan buah transisi dan buah mentah. Perbedaan gaya tersebut menjadi dasar penting untuk pengembangan sistem pemanenan mekanis yang selektif.

Model empiris berbasis indeks kematangan menghasilkan persamaan $FRF(M) = 0{,}732 + 2{,}983M - 0{,}183M^2$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9996 dan RMSE sebesar 0,036 N. Nilai galat yang rendah menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan data FRF secara sangat baik pada dataset pengamatan. Rasio FRF/massa juga meningkat dari buah merah ke buah hijau, yaitu 1181,67 N kg^{-1} pada merah, 2002,06 N kg^{-1} pada oranye, dan 2718,75 N kg^{-1} pada hijau. Hasil tersebut menunjukkan bahwa selektivitas mekanis lebih banyak dipengaruhi oleh kekuatan ikatan buah-tangkai daripada perbedaan massa buah.

Simulasi dinamis menunjukkan bahwa kombinasi amplitudo dan frekuensi dapat digunakan untuk mengatur pelepasan buah secara selektif. Pada amplitudo 2,0 mm, frekuensi kritis buah merah diperkirakan 122,32 Hz, sedangkan buah oranye dan hijau memerlukan 159,13 Hz dan 185,28 Hz. Rentang gaya optimum 3,6–5,8 N atau frekuensi sekitar 122–150 Hz pada amplitudo 2,0 mm direkomendasikan sebagai jendela awal untuk uji mesin pemanen selektif. Validasi lapangan tetap diperlukan agar model dapat dikalibrasi terhadap kondisi cabang, durasi getaran, arah gaya, dan variasi tanaman di kebun kopi robusta.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Rekayasa Pangan, Alat dan Mesin Pertanian, Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Jember. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Muarif selaku petani dan produsen Kopi Rengganis Desa Pakis, Kecamatan Sukorambi, Kabupaten Jember.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik. (2024). Statistik Kopi Indonesia 2023. BPS-Statistics Indonesia.

Badan Pusat Statistik. (2025). Statistik

Tanaman Perkebunan Tahunan Indonesia 2024 (Kelapa Sawit, Kopi, Kakao, Karet, Teh, dan Komoditas Perkebunan Unggulan). BPS-Statistics Indonesia.

Bizimungu, G., Ahouansou, R. H., Semassou, C., & Dusabumuremyi, J. C. (2022). Physical and mechanical properties of coffee cherries and beans in Africa: Review and the State of arts. Food Science and Technology, 10(3), 55-74. https://doi.org/10.13189/fst.2022.100301

Buitrago-Osorio, J., Tinoco, H. A., & Peña, F. M. (2022). Physical-mechanical characterization of coffee fruits Coffea arabica L. var. Castillo classified by a colorimetry approach. Materials Today: Proceedings.

Costa, A. G., de Sousa, D. A., Paes, J. L., Cunha, J. P. B., & de Oliveira, M. V. M. (2020). Classification of robusta coffee fruits at different maturation stages using colorimetric characteristics. Engenharia Agrícola, 40(4), 518-525. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n4p518-525/2020

Ferreira Júnior, L. G., Silva, F. M., Ferreira, D. D., Simão, S. D., Souza, G. C., & Ferreira, L. K. (2018). Characterization of the coffee fruit detachment force in crop subjected to mechanized harvesting. Coffee Science, 13(1), 71-79.

Ferreira Júnior, L. G., Silva, F. M., Santos, F. L., Souza, G. S., & Queiroz, D. M. (2020). Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. Computers and Electronics in Agriculture, 173, 105415.

Gomes, E. Q., Santos, F. L., Queiroz, D. M., Pinto, F. A. C., & Villibor, G. P. (2020). Transmissibility of coffee fruit-peduncle-branch systems submitted to harmonic vibrations. DYNA, 87(215), 61-68.

Jakob, M. C., *et al*. (2021). Fruit removal forces of early stage pickling cucumbers for harvest automation. International Agrophysics, 35, 111-120.

Meliala, S. B. P. S., Setiyono, Savitri, D. A., Arum, A. P., Hidayah, S. N., & Noviana, S. (2024). Physical and chemical characteristics of chosen genotype of Robusta coffee from Curahpoh Village Bondowoso East Java. Journal La Lifesci, (4). https://doi.org/10.37899/journallalifesci.v5i4.1338

Meneses, M. D., *et al*. (2024). Machine learning models for classifying coffee fruits detachment force across cultivars and irrigation systems. Agronomy Journal. https://doi.org/10.1002/agj2.21633

Pereira, M. R., *et al*. (2025). Evaluation of the transmissibility of vibration and dynamic behavior of coffee plants for selective harvesting. Biosystems Engineering.

Pu, Y., Toudeshki, A., Ehsani, R., & Yang, F. (2023). Recent progress and future prospects for mechanized harvesting of fruit crops. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 16(1), 1-12.

Santin, M. R., *et al*. (2023). Maturation and detachment force for mechanized harvesting of irrigated Conilon coffee in the Brazilian Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 58, e02967. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.02967

Villibor, G. P., Santos, F. L., Queiroz, D. M., Pinto, F. A. C., & Khoury Junior, J. K. (2023). Vibration transmissibility of the coffee fruit-peduncle system: A forced vibration study of high frequency aiming mechanical harvesting. Engenharia Agrícola, 43(1), e20220201.

Zhou, S., *et al*. (2025). Determining the vibration parameters for coffee harvesting based on fruit detachment dynamics. Agriculture, 15(10), 1036.