

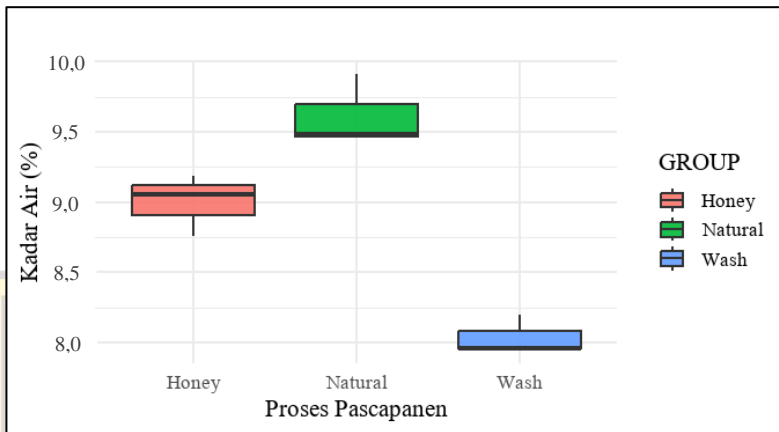
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Umum *Green Bean* Kopi Arabika Berdasarkan Metode Pascapanen

4.1.1 Kadar Air

Uji kadar air pada penelitian ini menggunakan metode oven. Hasil analisis kadar air pada biji kopi arabika menunjukkan nilai berkisar antara 7,95% hingga 9,91% (Lampiran 1). Nilai ini berada jauh di bawah batas maksimum kadar air yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) dan *International Coffee Organization* (ICO) sebesar 12,5%, sehingga menunjukkan bahwa biji kopi tersebut telah mengalami proses pengeringan yang memadai dan berada dalam kondisi yang aman untuk tahap pascapanen lanjutan seperti penyimpanan dan *roasting* (International Coffee Organization, 2002; SNI 01-2907-2008, 2008).

Kadar air ini mempengaruhi proses pascapanen selanjutnya seperti *roasting*, dimana seorang *roaster* (penyangrai kopi) harus menyesuaikan suhu *roasting* berdasarkan kadar air *green bean* kopi arabika untuk memperoleh hasil *roasting* yang terbaik (Baggenstoss *et al.*, 2008). Selain itu, kadar air yang rendah juga menandakan potensi yang lebih kecil terhadap pertumbuhan jamur seperti *Aspergillus* spp., yang biasanya berkembang pada biji dengan kelembapan tinggi (Dharmaputra *et al.*, 2021). Hasil uji kadar air pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4, dimana *green bean* kopi arabika yang digunakan dalam penelitian sudah memenuhi standar untuk tahap pascapanen selanjutnya seperti penyimpanan dan *roasting*.



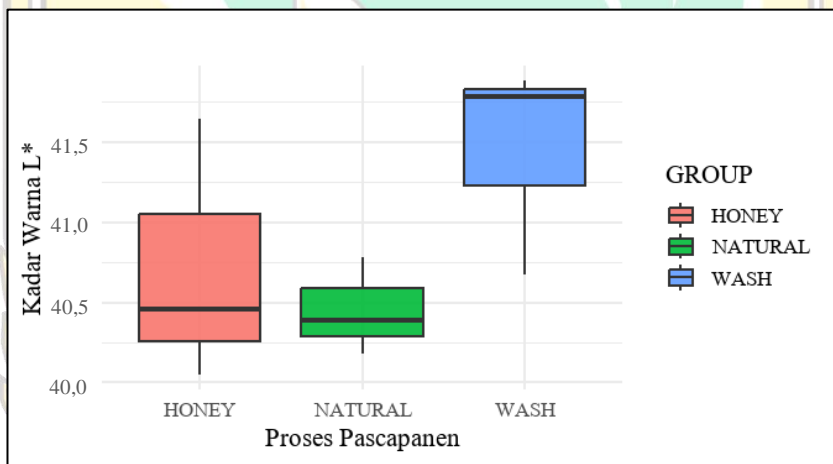
Gambar 1. Kadar Air *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda

Berdasarkan Gambar 4 dan Lampiran 1 diperoleh nilai kadar air tertinggi pada proses *natural*, dengan kadar air berkisar antara 9,46 – 9,91%. Nilai ini relatif lebih tinggi dibandingkan dengan proses pascapanen lainnya, yang mengindikasikan bahwa proses *natural* cenderung mempertahankan air lebih banyak di dalam biji kopi. Hal ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa pengeringan buah kopi dengan buah utuh cenderung mempertahankan air lebih lama dibandingkan proses yang lebih banyak menghilangkan struktur buah (Collazos-escobar *et al.*, 2025). Kemudian proses *honey* memiliki nilai kadar air berkisar antara 8,76 – 9,19%. Proses *honey* mempertahankan sebagian lendir kopi (*mucilage*), tetapi tanpa kulit buah, kondisi ini menengah antara *natural* dan *fully wash* dalam hal laju pengeringan, sehingga kadar airnya pun berada di tingkat menengah (Handayani *et al.*, 2025). Selanjutnya, proses *fully wash* memiliki nilai kadar air berkisar antara 7,94 – 8,2%. Proses *fully wash* melalui pencucian sebelum pengeringan, hal ini dapat mengurangi resistensi terhadap hilangnya air dan endosperm kopi, sehingga kadar air akhir menjadi lebih rendah dan konsisten (Alwi *et al.*, 2023).

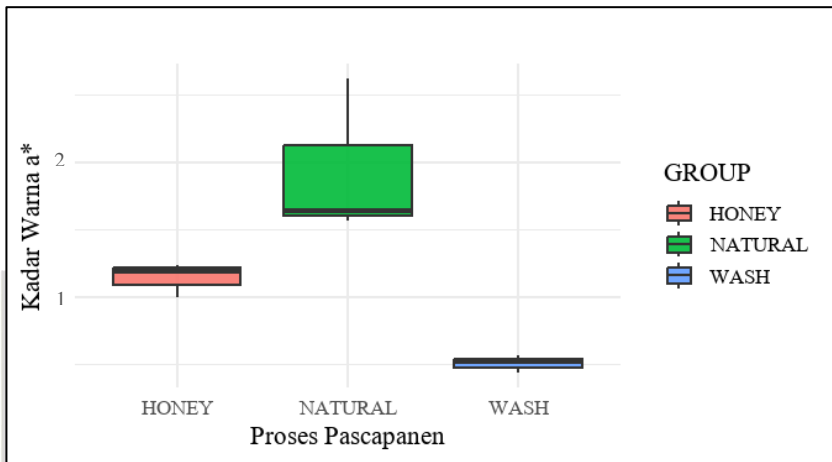
4.1.2 Warna

Analisis parameter warna pada penelitian ini menggunakan alat *Hunterlab Colorflex EZ*. Hasil pengukuran warna *green bean*

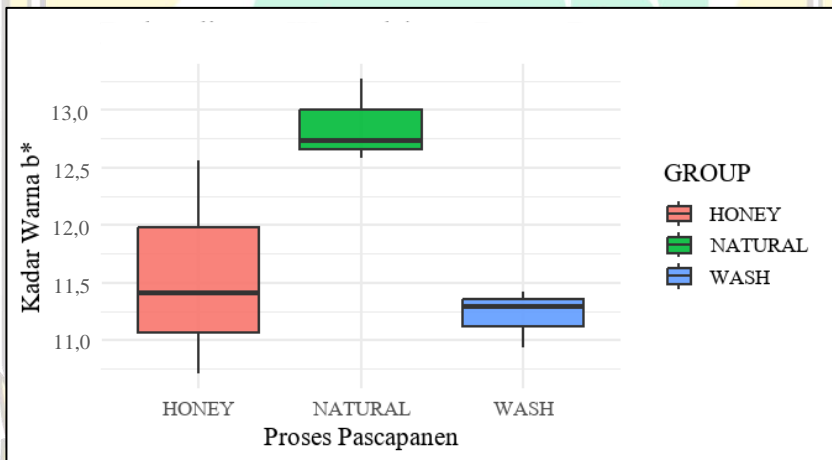
kopi arabika yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai L^* (kecerahan) berkisar antara 40,05 - 41,88, nilai a^* (arah merah-hijau) antara 0,44-2,62, dan nilai b^* (arah kuning-biru) antara 10,71-13,27. Nilai L^* yang relatif rendah tersebut menunjukkan bahwa warna biji kopi cenderung gelap ke arah kehijauan, yang merupakan ciri khas *green bean* kopi arabika yang telah mengalami pengeringan sempurna (Geneti, 2019). Perbedaan yang kecil pada nilai a^* dan b^* antar proses pascapanen mengindikasikan bahwa warna biji relatif stabil, dengan kecenderungan warna ke arah hijau kekuningan. Hal ini sesuai dengan karakteristik visual *green bean* kopi arabika berkualitas baik yang belum mengalami degradasi warna akibat oksidasi atau pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur (Dharmaputra *et al.*, 2021). Hasil pengukuran warna yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5 dan nilai perbandingan warna dapat dilihat pada Gambar 6.



(a)

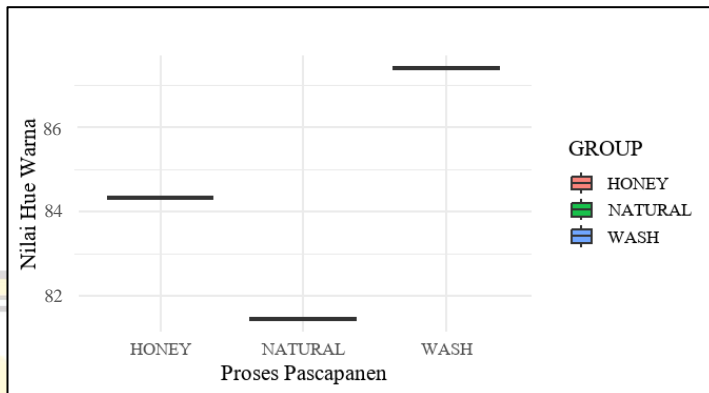


(b)



(c)

Gambar 2. Hasil Pengukuran Warna *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda (a) L^* (b) a^* (c) b^*



Gambar 3. Perbandingan Nilai Warna (Hue°) *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda

Berdasarkan Gambar 6 dan data warna (Lampiran 2) diperoleh nilai Hue° *green bean* kopi arabika menunjukkan perbedaan antar proses pascapanen. Seluruh proses pascapanen berada pada Kuadran I yaitu berkisar antara 81° - 87° yang berada pada rentang warna merah – kuning (McLELLAN *et al.*, 1994). Proses *fully wash* menghasilkan nilai Hue° tertinggi sebesar 87,40°, diikuti proses *honey* sebesar 84,34°, sedangkan proses *natural* menunjukkan nilai Hue° terendah yaitu 81,46°. Nilai Hue° yang lebih tinggi pada proses *fully wash* mengindikasikan bahwa warna *green bean* cenderung mengarah ke hijau cerah. Kondisi ini berkaitan dengan adanya proses fermentasi terkontrol dan tahap pencucian yang intensif pada proses *fully wash*, yang dapat mempercepat degradasi sebagian pigmen klorofil dan senyawa penyerta lainnya (Váradý *et al.*, 2022). Degradasi pigmen tersebut menyebabkan warna hijau menjadi lebih terang dan bersih secara visual, sehingga nilai Hue° yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan proses pascapanen lainnya. Sebaliknya, proses *natural* menghasilkan nilai Hue° terendah, yang menunjukkan kecenderungan warna *green bean* yang lebih hijau gelap. Pada proses ini, biji kopi dikeringkan bersama kulit buah dan *mucilage* tanpa melalui tahap pencucian, sehingga degradasi klorofil berlangsung lebih lambat (Dharmaputra *et al.*, 2021). Retensi

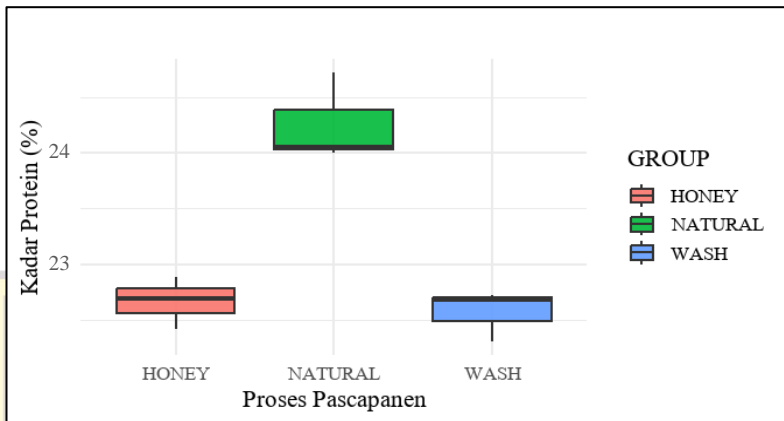
pigmen hijau yang lebih tinggi menyebabkan warna biji kopi tetap dominan hijau tua, yang tercermin pada nilai Hue° yang lebih rendah. Proses *honey* menunjukkan nilai Hue° sebesar **84,34°**, berada di antara proses *fully wash* dan *natural*, yang mencerminkan karakter **hijau kekuningan**. Pada proses *honey*, sebagian *mucilage* masih melekat selama proses pengeringan, sehingga tingkat degradasi pigmen hijau tidak setinggi pada *fully wash*, namun lebih besar dibandingkan proses *natural*. Kondisi ini menghasilkan warna *green bean* yang bersifat transisi antara hijau cerah dan hijau gelap.

4.2 Profil Metabolit Primer dan Sekunder *Green Bean* Kopi Arabika Berdasarkan Proses Pascapanen

4.2.1 Protein

Metabolit primer merupakan senyawa esensial yang berperan fundamental dalam mempertahankan kehidupan organisme karena dibutuhkan untuk proses pertumbuhan, perkembangan, dan reproduksi seluler. Salah satu senyawa metabolit primer adalah protein, yang berfungsi sebagai substrat energi, komponen struktural, maupun precursor biosintesis berbagai senyawa kompleks. Metabolit primer berpartisipasi langsung dalam berbagai jalur metabolisme sentral, seperti glikolisis, siklus asam trikarboksilat (TCA), dan siklus Calvin yang mengatur konversi energi dan bahan organik di dalam sel. Dalam hal ini, metabolit primer tidak hanya menyediakan energi dalam bentuk ATP dan NADH, tetapi juga menghasilkan intermediat metabolik yang menjadi bahan dasar untuk pembentukan metabolit sekunder dan senyawa bioaktif lainnya (Salam *et al.*, 2023).

Analisis kandungan protein pada penelitian ini menggunakan alat Spektrofotometer UV-1800 Shimadzu. Hasil pengukuran kadar protein *green bean* kopi arabika berkisar antara 22,3% hingga 24,7% (Lampiran 3). Nilai kadar protein yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 4. Kadar Protein *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda

Hasil kadar protein *green bean* kopi arabika yang disajikan pada Gambar 7 dan Lampiran 3 mengindikasikan bahwa kadar protein tertinggi terdapat pada *green bean* kopi arabika dengan proses *natural* dengan rata-rata 24,26%. Sedangkan pada proses *fully wash* dan *honey* memiliki kadar protein dengan perbedaan yang tidak jauh dengan rata-rata kadar protein masing-masingnya 22,66% dan 22,57%. Tingginya kadar protein pada proses *natural* diduga terkait dengan lama fermentasi yang lebih panjang dan aktivitas mikroba yang lebih tinggi selama penjemuran biji kopi utuh dengan kulit buahnya (De Bruyn *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019).

Fermentasi alami pada proses *natural* dapat meningkatkan degradasi senyawa kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana seperti asam amino dan peptida, yang kemudian memperkaya kandungan nitrogen terlarut sehingga berkontribusi pada peningkatan kadar protein (Zhang *et al.*, 2019). Proses *natural* juga berlangsung tanpa proses pencucian, sehingga kehilangan komponen nitrogen akibat pelarutan dalam air dapat diminimalkan (Banti & Abraham, 2021). Sebaliknya, pada proses *fully wash* tahapan fermentasi dilakukan dalam kondisi basah dan diikuti pencucian lendir menggunakan air yang berpotensi melarutkan sebagian senyawa nitrogen dan protein dalam air. Hal ini sejalan dengan penelitian De Bruyn *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa

pencucian intensif dapat menyebabkan penurunan metabolit primer, termasuk senyawa protein dan asam amino bebas akibat aktivitas enzimatis dan proses pelindian (proses keluarnya atau larutnya senyawa kimia dari suatu bahan padat ke dalam cairan pelarut). Selanjutnya, pada proses *honey* sebagian lapisan *mucilage* masih menempel pada biji kopi saat pengeringan. Kondisi ini memungkinkan fermentasi tetap terjadi, namun tidak seintensif pada proses *natural*. Selama fermentasi, mikroorganisme (terutama *yeast* dan *lactic acid bacteria*) menggunakan senyawa nitrogen dan karbohidrat sebagai substrat metabolisme. Beberapa enzim proteolitik yang dihasilkan mikroba dapat menghidrolisis protein menjadi peptida dan asam amino bebas. Namun, karena fermentasi berlangsung lebih singkat dan bersifat *semi-aerob* (oksigen tersedia sebagian), sebagian hasil degradasi ini dapat hilang melalui difusi dan oksidasi, terutama bila kadar air dan suhu pengeringan tinggi (De Bruyn *et al.*, 2017).

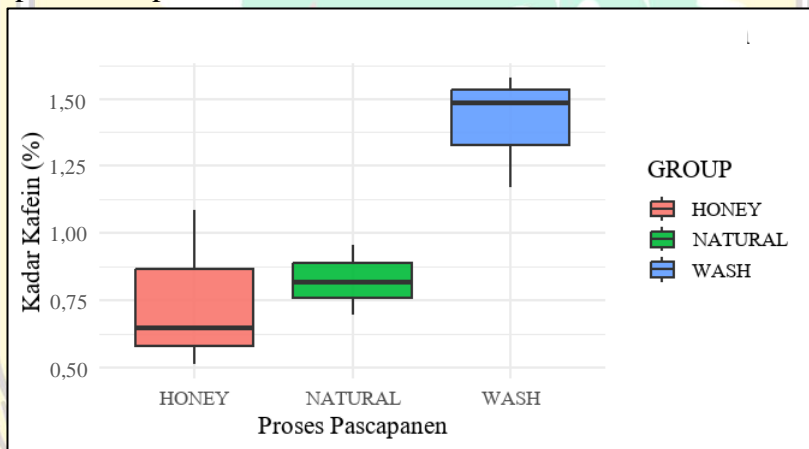
Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa proses pascapanen memberikan pengaruh terhadap kadar protein *green bean* kopi arabika, dimana proses *natural* berpotensi menghasilkan kualitas kimia yang kaya akan senyawa nitrogen yang berkontribusi dalam peningkatan kadar protein. Proses *natural* terbukti menghasilkan kadar protein yang lebih tinggi dibandingkan proses *fully wash* dan *honey*. Hal ini juga memperkuat penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh De Bruyn *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa perbedaan kondisi fermentasi dan tingkat aktivitas mikroba selama pascapanen dapat menyebabkan perubahan signifikan pada komposisi metabolit primer dan sekunder, termasuk protein dan asam amino bebas yang berperan penting dalam pembentukan karakteristik sensoris kopi.

4.2.2 Kafein

Kafein merupakan salah satu alkaloid purin yang paling dikenal dan menjadi komponen bioaktif utama dalam biji kopi. Senyawa ini berperan penting terhadap karakteristik sensoris kopi, terutama memberikan sensasi rasa pahit yang khas serta memiliki efek fisiologis sebagai stimulan sistem syaraf pusat yang

meningkatkan kewaspadaan dan performa kognitif yang mengkonsumsinya (Hu *et al.*, 2023). Kandungan kafein pada biji kopi dipengaruhi oleh berbagai faktor, diantaranya *genotype* atau varietas tanaman, kondisi agroklimat, serta proses pascapanen yang diterapkan. Proses pascapanen juga menentukan tingkat retensi varietas kimiawi, yaitu kemampuan biji kopi untuk mempertahankan profil metabolit khas varietasnya (Bastian *et al.*, 2021; Joët *et al.*, 2010).

Analisis kandungan kafein pada penelitian ini menggunakan alat Spektrofotometer UV-1800 Shimadzu. Hasil pengukuran kadar kafein *green bean* kopi arabika berkisar antara 0,51% hingga 1,58% (Lampiran 4). Nilai kadar kafein yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 5. Kadar Kafein *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda

Hasil analisis kadar kafein pada *green bean* kopi arabika yang disajikan pada Gambar 8 dan Lampiran 4, diperoleh proses *fully wash* memiliki rata-rata kadar kafein tertinggi yaitu 1,41%, sedangkan *natural* dan *honey* menunjukkan kadar kafein lebih rendah masing-masing 0,82% dan 0,75% yang dapat dikatakan tidak memiliki perbedaan diantara keduanya. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa proses pascapanen berpengaruh terhadap stabilitas dan retensi senyawa alkaloid khususnya kafein, yang bersifat relatif stabil terhadap panas namun sensitif terhadap

degradasi enzimatis dan fermentasi (De Bruyn *et al.*, 2017; Knopp *et al.*, 2005).

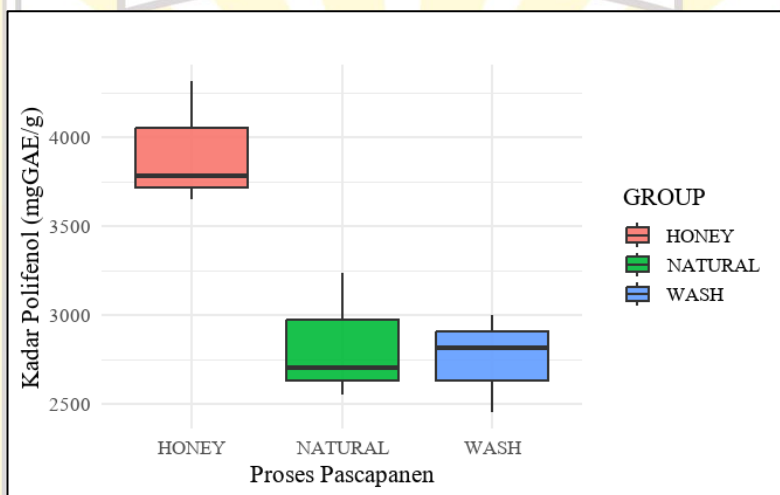
Secara keseluruhan, hasil yang peneliti peroleh memperkuat temuan sebelumnya bahwa proses pascapanen memiliki peranan penting dalam menentukan metabolit primer dan sekunder *green bean* kopi arabika, termasuk kadar kafein sebagai salah satu penanda mutu dan karakter sensoris kopi. Kandungan kafein yang lebih tinggi pada kopi *fully wash* diduga terkait dengan proses fermentasi basah yang lebih terkontrol serta pencucian lendir (*mucilage*) secara menyeluruh. Proses ini meminimalkan kontak antara biji dengan mikroorganisme selama pengeringan, sehingga menghambat degradasi metabolit sekunder termasuk kafein. Selain itu, proses pencucian dengan air bersih dapat menghilangkan sisa lendir yang menjadi substrat aktivitas mikroba, menjaga kestabilan komposisi kimia biji, dan mempertahankan kadar kafein tetap tinggi (De Bruyn *et al.*, 2017; Geneti, 2019). Proses pascapanen *fully wash* terbukti paling efektif dalam mempertahankan kandungan kafein pada *green bean* kopi arabika. Sedangkan proses *natural* dan *honey* menghasilkan *green bean* kopi arabika dengan kadar kafein lebih rendah akibat proses fermentasi dan pengeringan yang lebih lama. Dengan demikian, untuk menghasilkan kopi dengan kandungan kafein tinggi dan karakter rasa yang lebih kuat, proses pascapanen *fully wash* merupakan pilihan yang lebih tepat secara teknologis dan kimiawi.

4.2.3 Polifenol

Polifenol merupakan senyawa metabolit sekunder yang memiliki peranan penting dalam pertahanan fisiologis tanaman serta memberikan kontribusi besar terhadap aktivitas antioksidan dan manfaat kesehatan batu manusia. Dalam konteks kopi, polifenol tidak hanya berfungsi sebagai senyawa bioaktif yang berperan dalam menangkal radikal bebas dan menghambat oksidasi lipid, tetapi juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas sensoris kopi. Senyawa ini menjadi prekursor utama pembentukan warna, aroma, dan rasa pahit selama proses *roasting* nantinya,

melalui reaksi *Mailard* dan karamelisasi yang menghasilkan kompleksitas cita rasa khas kopi (Clifford, 2000).

Analisis kandungan polifenol pada penelitian ini menggunakan alat Spektrofotometer UV-1800 Shimadzu. Hasil pengukuran kadar polifenol *green bean* kopi arabika berkisar antara 2454,488 mgGAE/g hingga 4315,331 mgGAE/g (Lampiran 5). Nilai kadar polifenol yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 6. Kadar Polifenol *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda

Hasil analisis yang disajikan pada Gambar 9 dan Lampiran 5 mengindikasikan bahwa nilai rata-rata tertinggi kadar polifenol ditemukan pada proses *honey* sebesar 3918,6 mgGAE/g, diikuti oleh proses *natural* sebesar 2830,5 mgGAE/g, dan terendah pada proses *fully wash* sebesar 2756,4 mgGAE/g. Kemudian, visualisasi data dalam bentuk *boxplot* memperkuat hasil analisis tersebut, dimana sebaran nilai kadar polifenol pada proses *honey* berada pada kisaran yang lebih tinggi dan menunjukkan median yang jauh di atas dua proses pascapanen lainnya. Sementara itu, proses *natural* dan *fully wash* memiliki kisaran nilai yang relatif berdekatan, hal ini menandakan tingkat akumulasi polifenol yang tidak berbeda jauh diantara keduanya.

Tingginya kadar polifenol pada proses *honey* ini diduga disebabkan oleh keberadaan lapisan lendir (*mucilage*) yang masih menempel selama proses pengeringan. Kondisi ini memungkinkan terjadinya fermentasi alami oleh mikroorganisme, yang dapat menghidrolisis senyawa kompleks menjadi bentuk fenolik bebas, sehingga meningkatkan total kadar polifenol (Várady *et al.*, 2022). Sebaliknya, pada proses *fully wash* tahap pencucian yang intensif dapat menyebabkan sebagian senyawa fenolik larut dan hilang bersama air pencuci, sehingga kadar polifenol menjadi rendah (Kurniawan *et al.*, 2024). Kemudian, pada proses *natural* pengeringan bersama kulit dan lapisan *mucilage* dilakukan dalam rentang waktu yang cukup lama, hal ini dapat mempercepat reaksi oksidasi non-enzimatik, sehingga sebagian besar polifenol teroksidasi menjadi senyawa melanoidin atau polimer coklat lain yang tidak terdeteksi dalam bentuk total fenol (Alves *et al.*, 2021).

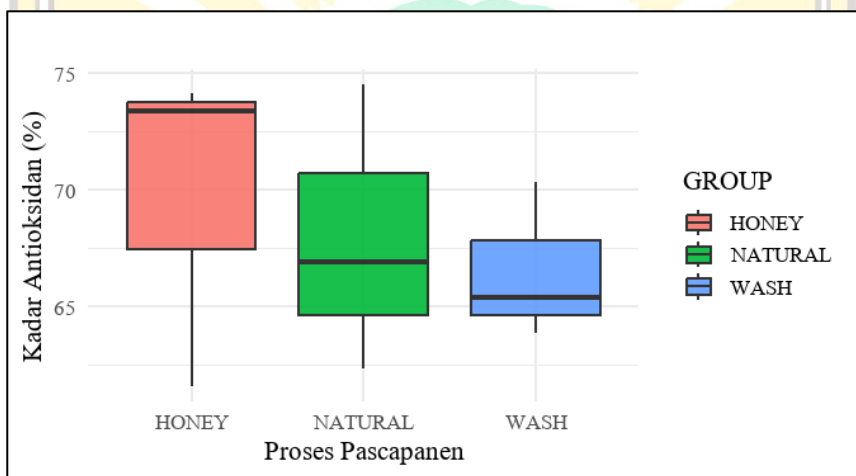
Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh De Bruyn *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa perbedaan proses pascapanen berpengaruh signifikan terhadap komposisi metabolit sekunder termasuk polifenol pada biji kopi. Proses dengan fermentasi terbatas seperti *honey* cenderung menghasilkan kandungan polifenol yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh aktivitas enzimatik yang berlangsung lebih lama dan minim kehilangan senyawa larut.

4.2.4 Antioksidan

Aktivitas antioksidan merupakan indikator penting yang menggambarkan kemampuan senyawa bioaktif dalam kopi untuk menetralkan spesies oksigen reaktif (*Reactive Oxygen Species*, ROS) yang dapat menyebabkan stres oksidatif pada sistem biologis. Senyawa fenolik, khususnya polifenol memiliki peranan utama dalam mekanisme ini melalui donasi atom hidrogen atau elektron kepada radikal bebas, sehingga menghambat reaksi berantai oksidatif. Namun demikian, kapasitas antioksidan total yang terukur tidak hanya ditentukan oleh kontribusi polifenol semata, melainkan merupakan hasil sinergi berbagai komponen kimia lainnya yang terdapat dalam biji kopi seperti kafein,

trigonelin, asam klorogenat, serta sejumlah asam organik dan senyawa volatil lain yang juga memiliki aktivitas penangkap radikal (Górecki & Hallmann, 2020; Jeszka-Skowron *et al.*, 2016).

Analisis aktivitas antioksidan pada penelitian ini menggunakan alat Spektrofotometer UV-1800 Shimadzu. Hasil pengukuran aktivitas antioksidan *green bean* kopi arabika berkisar antara 61,597 % hingga 74,525 % (Lampiran 6). Nilai aktivitas antioksidan yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 7. Aktivitas Antioksidan *Green Bean* Kopi Arabika dengan Proses Pascapanen Berbeda

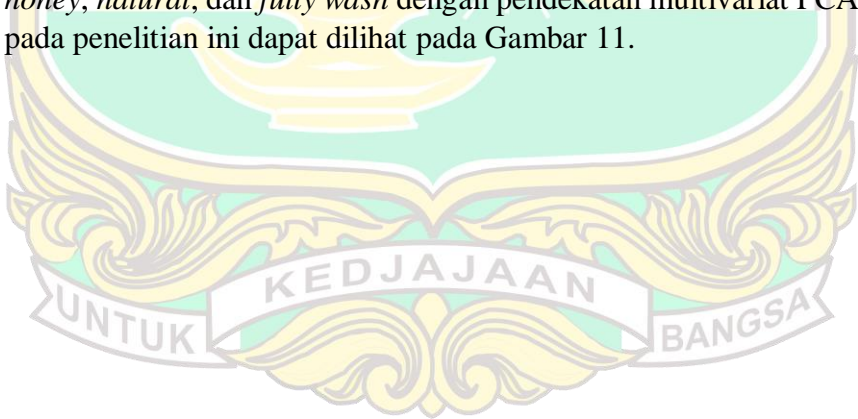
Hasil analisis yang disajikan pada Gambar 10 dan Lampiran 6 mengindikasikan bahwa rata-rata aktivitas antioksidan tertinggi diperoleh pada proses *honey* sebesar 69,71%, diikuti oleh *natural* sebesar 67,93%, dan *fully wash* sebesar 66,54%. Tren peningkatan aktivitas antioksidan terlihat pada proses *honey* dibandingkan dua proses pascapanen lainnya. Kemudian, visualisasi dalam bentuk *boxplot* menunjukkan bahwa secara nilai aktivitas antioksidan pada proses *honey* cenderung berada di kisaran yang lebih tinggi dengan median mendekati angka 70%, sedangkan proses *natural* dan *fully wash* menunjukkan kisaran yang lebih rendah dan berdekatan. Pola ini sejalan dengan kadar polifenol yang lebih

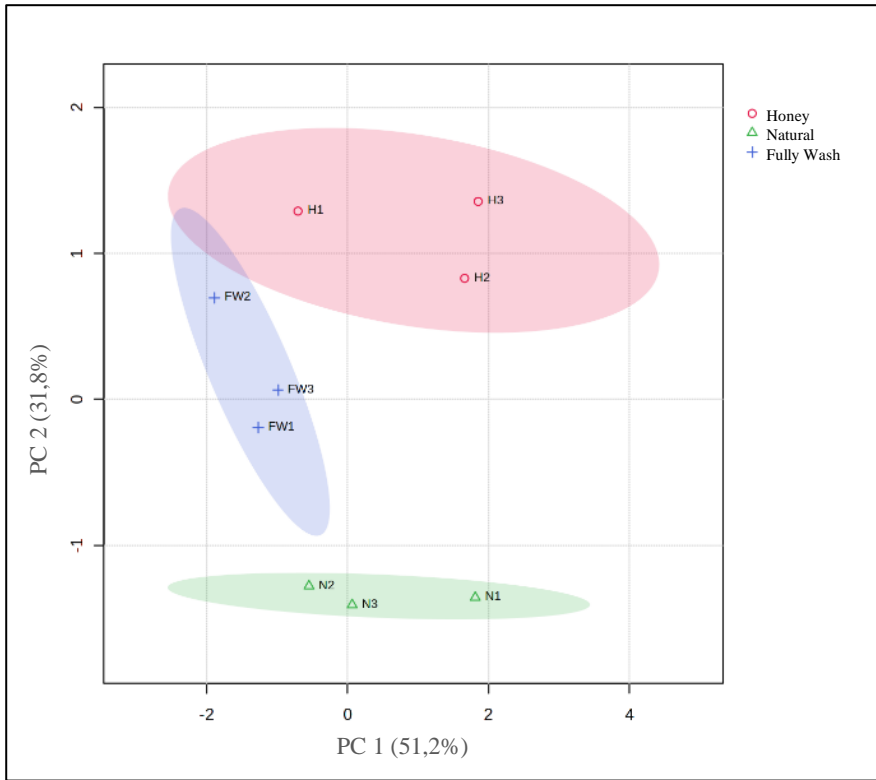
tinggi pada proses *honey*, mengindikasikan bahwa senyawa fenolik berkontribusi besar terhadap aktivitas antioksidan pada *green bean* kopi arabika.

Tingginya aktivitas antioksidan pada proses *honey* ini diduga disebabkan oleh proses pengeringan dengan sebagian lapisan *mucilage* yang masih menempel pada biji, sehingga terjadi hidrolisis senyawa kompleks yang dapat meningkatkan jumlah senyawa fenolik seperti asam klorogenat, asam kafeat, dan flavonoid bebas yang memiliki kapasitas tinggi dalam menangkap radikal bebas (ROS). Hal ini dapat memperkuat aktivitas antioksidan total (Jeszka-Skowron *et al.*, 2016). Selanjutnya, aktivitas antioksidan pada proses *natural* menunjukkan nilai yang relatif tinggi, namun masih lebih rendah dibandingkan proses *honey*. Hal ini disebabkan oleh proses pengeringan dilakukan bersama kulit buah dan lapisan *mucilage* secara utuh di bawah sinar matahari, kondisi ini menyebabkan fermentasi berlangsung terbuka dengan paparan oksigen dan cahaya matahari yang tinggi. Akibatnya, meskipun mikroorganisme alami tetap berperan dalam degradasi senyawa kompleks, laju oksidasi senyawa fenolik meningkat secara signifikan terutama oleh aktivitas enzim polifenol oksidase (PPO) dan peroksidase (POD) yang memicu reaksi pencoklatan (*browning reaction*) (De Bruyn *et al.*, 2017). Oksidasi tersebut mengubah senyawa fenolik aktif seperti asam klorogenat, asam ferulat, dan flavonoid menjadi produk melanoidin berwarna coklat tua yang memiliki aktivitas antioksidan lebih rendah (Osorio-Pérez *et al.*, 2022). Sementara itu, pada proses *fully wash* tahap pencucian intensif menyebabkan pelarutan senyawa fenolik dan asam organik ke dalam panci pencuci sehingga menurunkan total komponen bioaktif yang berperan sebagai antioksidan (De Bruyn *et al.*, 2017). Dengan demikian, perbedaan aktivitas antioksidan antar proses pascapanen dipengaruhi oleh interaksi antara proses fermentasi, degradasi termal, dan pelarutan senyawa fenolik selama proses pascapanen. Proses *honey* cenderung mampu mempertahankan aktivitas antioksidan yang lebih tinggi dibandingkan *fully wash* dan *natural*.

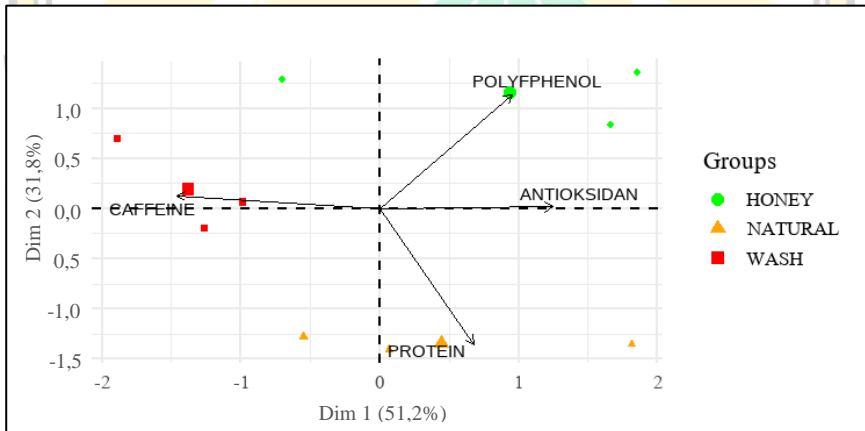
4.3 Pola Hubungan Metabolit Primer dan Sekunder *Green Bean Kopi Arabika*

Analisis pola hubungan metabolit primer dan sekunder pada penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan multivariat *Principal Component Analysis* (PCA) dan *Heatmap*. Plot skor pada analisis PCA menyajikan pemisahan yang jelas antar sampel kopi arabika berdasarkan proses pascapanen (*fully wash*, *natural*, dan *honey*). Pola distribusi titik data yang membentuk klaster terpisah pada masing-masing proses pascapanen mengindikasikan adanya perbedaan dalam metabolit primer dan sekunder *green bean* kopi arabika. Klaster terpisah ini menandakan bahwa setiap proses pascapanen memicu perubahan biokimia spesifik yang disebabkan oleh kondisi fermentasi, kadar air, aktivitas mikroba, dan durasi pengeringan yang berbeda. Selama fermentasi, mikroorganisme memodulasi jalur metabolisme utama seperti degradasi polisakarida, transformasi asam organik, dan oksidasi senyawa fenolik, sehingga menghasilkan komposisi metabolit khas untuk tiap proses pascapanen (De Bruyn *et al.*, 2017). Secara keseluruhan, hasil analisis karakteristik metabolit primer dan sekunder (kafein, protein, polifenol, dan antioksidan) *green bean* kopi arabika proses *honey*, *natural*, dan *fully wash* dengan pendekatan multivariat PCA pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 11.





(a)



(b)

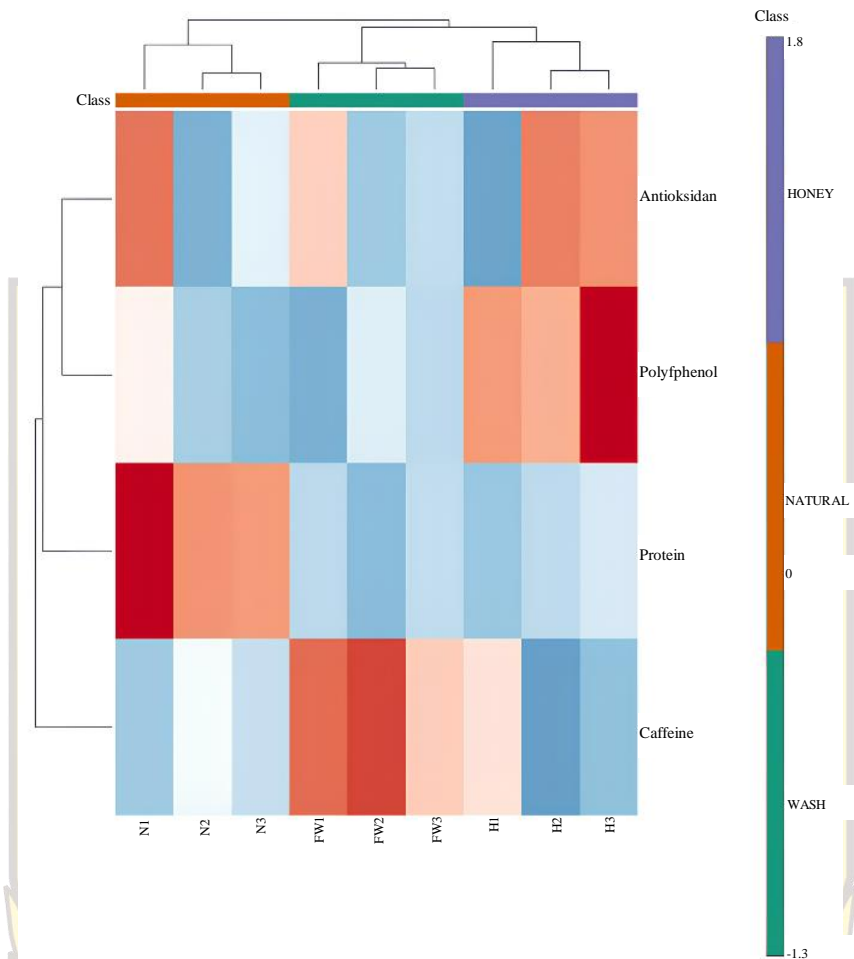
Gambar 11. (a) Score Plot dan (b) biplot PCA Karakterisasi Metabolit Primer dan Sekunder *Green Bean* Kopi Arabika

Plot skor dan *biplot* PCA menyajikan adanya pemisahan yang jelas (*clear separation*) antara ketiga proses pascapanen. Sampel dari proses *honey* (merah) membentuk kluster tersendiri di bagian atas. Selanjutnya sampel *natural* (hijau) cenderung terletak di sisi bawah dan agak terpisah ke kanan. Kemudian, sampel *fully wash* (biru) terkonsentrasi di sisi kiri diagram. Pemisahan antar kluster ini mengindikasikan bahwa setiap proses pascapanen menghasilkan profil metabolit dan komponen kimia yang berbeda secara multivariat. Dengan kata lain, komposisi senyawa bioaktif termasuk kafein, protein, polifenol, dan aktivitas antioksidan bervariasi signifikan akibat perbedaan perlakuan fermentasi dan pencucian. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh De Bruyn *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa proses pascapanen kopi mempengaruhi komunitas mikroba dan jalur biokimia fermentasi, sehingga menghasilkan diferensiasi metabolit antar proses pascapanen.

Hasil analisis PCA pada Gambar 11 menyajikan dua komponen utama yaitu PC1 dan PC2. Sumbu X (PC1) menjelaskan 51,2% variasi total data dan dipengaruhi kuat oleh variabel polifenol dan aktivitas antioksidan yang berasosiasi dengan kapasitas bioaktif kopi. Sedangkan Sumbu Y (PC2) menjelaskan 31,8% variasi dan terutama dipengaruhi oleh kafein dan protein yang merefleksikan karakteristik metabolit primer hasil fermentasi pada proses pascapanen. Kedua komponen utama tersebut mampu menjelaskan total 83% ragam data, yang berarti bahwa kedua sumbu utama ini sudah mewakili sebagian besar variasi yang terdapat pada seluruh variabel pengamatan. Proses *honey* memiliki skor PC1 positif, yang mengindikasikan kontribusi besar dari senyawa fenolik (polifenol) dan antioksidan. Sedangkan *fully wash* dan *natural* memiliki skor PC1 negatif, yang mengindikasikan penurunan kadar bioaktif akibat degradasi atau pelindian. Sedangkan pada PC2, sampel *honey* dan *fully wash* memiliki variasi kafein dan protein lebih besar dibandingkan *natural* yang berada di sisi negatif dengan kadar protein yang relatif homogen.

Secara keseluruhan, hasil PCA mengindikasikan bahwa proses pascapanen sangat berpengaruh terhadap kandungan metabolit primer dan sekunder *green bean* kopi arabika. Posisi kluster yang terpisah menandakan bahwa setiap proses pascapanen menghasilkan profil metabolit yang berbeda secara kimiawi (De Bruyn *et al.*, 2017). Namun, aktivitas antioksidan termasuk beberapa asam klorogenat yang paling menonjol, ditemukan pada tingkat yang serupa di semua proses pascapanen. Hal ini mengindikasikan bahwa potensi aktivitas antioksidan merupakan karakteristik yang lestari dari *green bean* kopi arabika (Cwikova *et al.*, 2022). Hasil ini memperkuat hipotesis bahwa profil metabolit dapat berfungsi sebagai alat kendali mutu dan untuk verifikasi keaslian kopi.

Proses analisis *Heatmap* juga digunakan dalam analisis pola hubungan metabolit primer dan sekunder *green bean* kopi arabika ini. Hal ini disebabkan analisis *heatmap* mampu memberikan informasi yang lebih detail tentang komposisi biomarker kimia (metabolit) dan perubahan temporal dibandingkan PCA (Kim & Blair, 2023). Normalisasi data pada analisis ini menggunakan jarak (*Distance*) *Euclidean* dan proses pengelompokkan (*linkage*) *Complete*. Jarak *Euclidean* digunakan untuk menilai kedekatan antar sampel berdasarkan kesamaan nilai absolut, sedangkan *Complete Linkage* digunakan untuk mengelompokkan sampel dengan mempertimbangkan jarak maksimum antar anggota kelompok, sehingga hanya sampel yang benar-benar mirip yang masuk ke satu kluster yang sama. Dendogram *Heatmap* karakterisasi metabolit primer dan sekunder *green bean* kopi arabika dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Dendrogram *Heatmap* Karakterisasi Metabolit Primer dan Sekunder *Green Bean* Kopi Arabika

Dendrogram *Heatmap* memperlihatkan adanya pemisahan yang jelas antar proses pascapanen, dimana sampel dengan proses pascapanen yang sama membentuk kluster homogen. Kluster pertama proses *honey* dengan warna ungu, kemudian kluster kedua proses *fully wash* dengan warna hijau, dan *natural* dengan warna oranye. Selain itu, dendrogram juga menyajikan distribusi 4 (empat) variabel metabolit primer dan sekunder pada 9 (sembilan) sampel *green bean* kopi arabika (3 proses pascapanen \times 3 ulangan). Pada

bagian atas dan kiri dendogram terdapat leher yang menghubungkan sampel dan senyawa metabolit, dimana leher pada bagian atas dendogram menunjukkan hubungan antar sampel dan leher pada dendogram kiri menunjukkan hubungan antar senyawa metabolit.

Leher pada dendogram ini merupakan cabang vertikal dan horizontal yang menunjukkan tingkat disimilari (perbedaan) antar sampel atau variabel saat penggabungan klaster. Berdasarkan leher dendogram atas, masing-masing sampel membentuk leher dendogram yang pendek di dalam klaster, tetapi panjang antar klaster (Zhang *et al.*, 2017). Leher pendek dalam satu klaster (misalnya H1 – H3) mengindikasikan kemiripan yang tinggi antar ulangan, sehingga data replikasi sangat konsisten. Sedangkan leher panjang antar klaster (misalnya antara *honey* dan *fully wash*) mengindikasikan jarak metabolit yang jauh dan profil kimia yang sangat berbeda. *Heatmap* pada Gambar 12 menyajikan leher panjang antar tiga proses pascapanen menandakan bahwa proses pascapanen menghasilkan perbedaan metabolit yang signifikan. Hal ini sejalan dengan temuan De Bruyn *et al.* (2017) bahwa variasi fermentasi dan pencucian selama pascapanen membentuk profil kimia yang unik melalui mekanisme oksidasi enzimatis dan degradasi termal. Selanjutnya pada leher dendogram di sisi kiri, terlihat pola keterkaitan antar senyawa metabolit. Polifenol dan antioksidan membentuk klaster yang sangat dekat dengan leher pendek, hal ini menunjukkan hubungan positif yang kuat. Keterkaitan ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa semakin tinggi kandungan polifenol, semakin tinggi pula aktivitas antioksidan (Górecki & Hallmann, 2020; Jeszka-Skowron *et al.*, 2016). Selanjutnya protein berada di cabang terpisah namun masih cukup dekat, artinya protein memiliki kontribusi tidak langsung melalui degradasi enzimatis selama fermentasi. Sementara kafein terletak di cabang paling jauh dengan leher yang panjang, hal ini mengindikasikan bahwa kadar kafein bersifat lebih stabil dan tidak sejalan langsung dengan perubahan pada fenolik atau protein (Jeszka-Skowron *et al.*, 2016).

Dendrogram *Heatmap* ini menyajikan intensitas nilai menggunakan warna, dimana warna merah menyatakan tingginya nilai kandungan senyawa metabolit, warna putih menyatakan kandungan sedang, sedangkan warna biru menyatakan rendahnya kandungan senyawa metabolit (Lee *et al.*, 2016). Berdasarkan Gambar 12, hasil penelitian ini menyajikan aktivitas antioksidan yang dominan pada proses *honey* dengan warna merah-oranye. Sedangkan pada *natural* dan *fully wash* juga terdapat aktivitas antioksidan namun lebih dominan dengan warna biru, yang artinya aktivitas antioksidan lebih rendah. Hal ini memperkuat temuan bahwa proses *honey* mempertahankan senyawa fenolik aktif karena adanya fermentasi di bawah lapisan *mucilage* yang masih menempel (Jeszka-Skowron *et al.*, 2016). Selanjutnya pada kandungan polifenol, juga menunjukkan intensitas tinggi (merah) pada kluster *honey* dan sebagian *natural*, sedangkan *fully wash* berwarna biru yang menandakan penurunan kadar polifenol akibat pencucian. Kemudian, kadar protein tampak lebih tinggi pada proses *natural* dengan warna merah-oranye dibandingkan dengan *fully wash* dan *honey* dengan warna dominan biru. Hal ini sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa fermentasi lebih lama pada proses *natural* meningkatkan degradasi senyawa kompleks dan memperkaya nitrogen terlarut (Salam *et al.*, 2023). Sementara kadar kafein ditemukan lebih tinggi pada proses *fully wash* dengan warna merah yang diikuti oleh *honey*, sedangkan pada *natural* warna dominan biru. Hal ini dikarenakan proses pencucian dan pengeringan yang lebih singkat pada *fully wash* sehingga menyebabkan degradasi kafein lebih kecil (De Bruyn *et al.*, 2017). Analisis multivariat (PCA dan *Heatmap*) memperkuat hasil ini dengan menyajikan pemisahan kluster yang jelas antar proses pascapanen, hal ini menandakan bahwa setiap proses pascapanen menghasilkan profil metabolit yang khas dan berbeda secara kimiawi.

4.4 Pengaruh Proses Pascapanen terhadap Warna serta Metabolit Primer dan Sekunder

4.4.1 Warna

Uji statistik metode ANOVA digunakan untuk memperoleh pengaruh nilai warna pada *green bean* kopi arabika dengan proses pascapanen berbeda. Hasil uji ANOVA dapat dilihat pada Tabel 3 – 5 dan Lampiran 2.

Tabel 1. Hasil Uji ANOVA Parameter Warna Komponen L* *Green Bean* Kopi Arabika

Proses Pascapanen	L* Value (Rata-rata \pm SD)	p-value
<i>Fully Wash</i>	41,44 \pm 0,067	0,7832
<i>Natural</i>	40,45 \pm 0,30	
<i>Honey</i>	40,72 \pm 0,83	

Berdasarkan hasil analisis komponen warna L* (kecerahan), rata-rata nilai L* yang diperoleh berkisar antara 40,45 – 41,44 yang mengindikasikan bahwa seluruh sampel memiliki tingkat kecerahan yang relatif sama. Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan ($p > 0,05$) diantara ketiga proses pascapanen. Secara fisiologis, warna *green bean* kopi dipengaruhi oleh kandungan klorofil, senyawa fenolik, serta tingkat kematangan buah saat panen. Proses pascapanen seperti fermentasi, pencucian, dan pengeringan juga dapat mempengaruhi parameter warna, termasuk L* (Selmar *et al.*, 2017). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa perlakuan yang diberikan tidak cukup menghasilkan perubahan pada struktur pigmen biji kopi atau mekanisme degradasi klorofil yang biasanya menyebabkan perubahan nilai L*.

Tabel 4. Hasil Uji ANOVA Parameter Warna Komponen a* *Green Bean Kopi Arabika*

Proses Pascapanen	a* Value (Rata-rata \pm SD)	p-value
<i>Natural</i>	1,94 \pm 0,59	0,1392
<i>Fully Wash</i>	0,51 \pm 0,07	
<i>Honey</i>	1,14 \pm 0,13	

Berdasarkan hasil analisis komponen warna a* (sumbu merah-hijau), rata-rata nilai yang diperoleh berkisar antara 0,51 – 1,94. Nilai komponen a* yang lebih tinggi diperoleh pada proses pascapanen *natural*, yang mengindikasikan bahwa biji kopi yang di proses secara *natural* memiliki kecenderungan warna lebih kemerahan. Sebaliknya, *fully wash* dan *honey* menghasilkan nilai a* yang relatif rendah dan tidak berbeda jauh satu sama lain. Hal ini mengindikasikan bahwa penghilangan atau pengurangan lendir pada proses pascapanen berperan dalam menstabilkan warna permukaan biji dan mengurangi potensi oksidasi pigmen yang menyebabkan perubahan warna ke arah merah (Knopp *et al.*, 2005). Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan ($p > 0,05$) diantara ketiga proses pascapanen.

Tabel 5. Hasil Uji ANOVA Parameter Warna Komponen b* *Green Bean Kopi Arabika*

Proses Pascapanen	b* Value (Rata-rata \pm SD)	p-value
<i>Natural</i>	12,86 \pm 0,36	0,7787
<i>Fully Wash</i>	11,22 \pm 0,25	
<i>Honey</i>	11,56 \pm 0,93	

Berdasarkan hasil analisis komponen warna b* (sumbu kuning-biru), rata-rata nilai yang diperoleh berkisar antara 11,22 – 12,86. Nilai komponen b* yang lebih tinggi diperoleh pada proses pascapanen *natural*, yang mengindikasikan bahwa biji kopi yang di proses secara *natural* memiliki kecenderungan warna lebih kekuningan. Sebaliknya, *fully wash* dan *honey* menghasilkan nilai

b* yang relatif rendah dan tidak berbeda jauh satu sama lain. Hal ini mengindikasikan bahwa penghilangan atau pengurangan lendir berkontribusi dalam menekan pembentukan pigmen kekuningan (Knopp *et al.*, 2005). Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan ($p > 0,05$) diantara ketiga proses pascapanen.

Hasil penelitian menyajikan ketiga komponen warna kecerahan (L^*), intensitas merah-hijau (a^*), dan intensitas kuning-biru (b^*) menunjukkan bahwa perlakuan pascapanen tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap karakteristik visual *green bean* kopi arabika. Nilai L^* , a^* , b^* yang tidak berbeda signifikan antar perlakuan mengindikasikan tingkat kecerahan biji yang hampir serupa. Secara keseluruhan, ketiga parameter warna tersebut menguatkan bahwa setiap proses pascapanen menghasilkan profil kolorimetri yang tidak berbeda signifikan, namun juga dapat menjadi indikator penting dalam menilai kualitas visual dan potensi karakter sensori *green bean* kopi arabika. Hal ini menunjukkan bahwa proses *natural* menghasilkan warna *green bean* dengan rona kuning gelap, sedangkan proses *honey* cenderung ke arah rona hijau kekuningan, dan *fully wash* cenderung menghasilkan warna *green bean* lebih kehijauan dan cerah.

4.4.2 Protein

Uji statistik metode ANOVA dengan *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) digunakan untuk memperoleh pengaruh nilai kadar protein pada *green bean* kopi arabika dengan proses pascapanen berbeda. Hasil uji ANOVA kadar protein dapat dilihat pada Tabel 6 dan Lampiran 3.

Tabel 6. Hasil Uji ANOVA Kadar Protein *Green Bean* Kopi Arabika

Proses Pascapanen	Kadar Protein (%) (Rata-rata \pm SD)	p-value	Hasil Uji Duncan
<i>Fully Wash</i>	22,57 \pm 0,23	0,000709	b
<i>Natural</i>	24,26 \pm 0,40		a
<i>Honey</i>	22,66 \pm 0,23		b

Hasil analisis kadar protein *green bean* kopi arabika yang disajikan pada Tabel 6 mengindikasikan adanya pengaruh nyata ($p < 0,05$) perbedaan proses pascapanen terhadap kadar protein yang dihasilkan. Berdasarkan uji lanjut Duncan (Lampiran 3), rata-rata kadar protein tertinggi terdapat pada *green bean* kopi arabika dengan proses *natural* sebesar 24,26%. Sedangkan pada proses *fully wash* dan *honey* memiliki kadar protein dengan perbedaan yang tidak signifikan masing-masingnya 22,66% dan 22,57%. Hasil uji lanjut Duncan membagi kelompok ke dalam 2 (dua) grup yang berbeda yaitu kelompok dengan huruf “a” dan “b”, dimana proses *natural* masuk ke kelompok “a”, kemudian *honey* dan *fully wash* masuk ke kelompok “b”. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik proses *natural* menghasilkan pengaruh nilai kadar protein yang berbeda nyata ($p < 0,05$) dibandingkan proses *honey* dan *fully wash*.

4.4.3 Kafein

Uji statistik metode ANOVA dengan *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) digunakan untuk memperoleh pengaruh nilai kadar kafein pada *green bean* kopi arabika dengan proses pascapanen berbeda. Hasil uji ANOVA kadar kafein dapat dilihat pada Tabel 7 dan Lampiran 4.

Tabel 7. Hasil Uji ANOVA Kadar Kafein *Green Bean* Kopi Arabika

Proses Pascapanen	Kadar Kafein (%) (Rata- rata \pm SD)	p-value	Hasil Uji Duncan
<i>Fully Wash</i>	1,41 \pm 0,21	0,0219	a
<i>Natural</i>	0,82 \pm 0,13		b
<i>Honey</i>	0,75 \pm 0,30		b

Hasil analisis kadar kafein pada *green bean* kopi arabika yang disajikan pada Tabel 7 menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$) antar proses pascapanen berdasarkan uji lanjut Duncan. Proses *fully wash* memiliki rata-rata kadar kafein tertinggi yaitu 1,41%, sedangkan *natural* dan *honey* menunjukkan kadar kafein lebih rendah masing-masing 0,82% dan 0,75% yang dapat

dikatakan tidak memiliki perbedaan nyata diantara keduanya. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa proses pascapanen berpengaruh terhadap stabilitas dan retensi senyawa alkaloid khususnya kafein, yang bersifat relatif stabil terhadap panas namun sensitif terhadap degradasi enzimatis dan fermentasi (De Bruyn *et al.*, 2017; Knopp *et al.*, 2005). Hasil uji lanjut Duncan membagi kelompok ke dalam 2 (dua) grup yang berbeda yaitu kelompok dengan huruf “a” dan “b”, dimana proses *fully wash* masuk ke kelompok “a”, kemudian *honey* dan *natural* masuk ke kelompok “b”. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik proses *fully wash* menghasilkan pengaruh nilai kadar kafein yang berbeda nyata ($p < 0,05$) dibandingkan proses *honey* dan *natural*.

4.4.4 Polifenol

Uji statistik metode ANOVA dengan *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) digunakan untuk memperoleh pengaruh nilai kadar polifenol pada *green bean* kopi arabika dengan proses pascapanen berbeda. Hasil uji ANOVA kadar polifenol dapat dilihat pada Tabel 8 dan Lampiran 5.

Tabel 8. Hasil Uji ANOVA Kadar Polifenol *Green Bean* Kopi Arabika

Proses Pascapanen	Kadar Polifenol (mgGAE/g) (Rata-rata \pm SD)	p-value	Hasil Uji Duncan
<i>Fully Wash</i>	2756,43 \pm 278,00	0,00871	b
<i>Natural</i>	2830,54 \pm 359,62		b
<i>Honey</i>	3918,61 \pm 349,85		a

Hasil analisis yang disajikan pada Tabel 8 mengindikasikan bahwa kadar polifenol *green bean* kopi arabika dipengaruhi secara nyata ($p < 0,05$) oleh perbedaan proses pascapanen. Nilai rata-rata tertinggi kadar polifenol ditemukan pada proses *honey* sebesar 3918,6 mgGAE/g, diikuti oleh proses *natural* sebesar 2830,5 mgGAE/gr, dan terendah pada proses *fully wash* sebesar 2756,4 mgGAE/gr. Hasil uji lanjut Duncan membagi kelompok ke dalam 2 (dua) grup yang berbeda yaitu kelompok dengan huruf “a” dan “b”, dimana proses *honey* masuk ke kelompok “a”, kemudian *natural*

dan *fully wash* masuk ke kelompok “b”. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik proses *honey* menghasilkan pengaruh nilai kadar polifenol yang berbeda nyata ($p < 0,05$) dibandingkan proses *natural* dan *fully wash*.

4.4.5 Aktivitas Antioksidan

Uji statistik metode ANOVA dengan *Duncan's Multiple Range Test* (DMRT) digunakan untuk memperoleh pengaruh nilai aktivitas antioksidan pada *green bean* kopi arabika dengan proses pascapanen berbeda. Hasil uji ANOVA aktivitas antioksidan dapat dilihat pada Tabel 9 dan Lampiran 6.

Tabel 9. Hasil Uji ANOVA Aktivitas Antioksidan *Green Bean* Kopi Arabika

Proses Pascapanen	Aktivitas Antioksidan (%) (Rata-rata \pm SD)	p-value
<i>Fully Wash</i>	66,54 \pm 3,38	0,801
<i>Natural</i>	67,93 \pm 6,15	
<i>Honey</i>	69,71 \pm 7,03	

Hasil analisis yang disajikan pada Tabel 9 mengindikasikan bahwa perbedaan proses pascapanen tidak berpengaruh secara nyata ($p > 0,05$) terhadap aktivitas antioksidan *green bean* kopi arabika. Rata-rata aktivitas antioksidan tertinggi diperoleh pada proses *honey* sebesar 69,71%, diikuti oleh *natural* sebesar 67,93%, dan *fully wash* sebesar 66,54%. Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik ketiga proses pascapanen menghasilkan pengaruh nilai aktivitas antioksidan yang tidak berbeda nyata ($p > 0,05$).