

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hubungan Abiotik dengan Intensitas Serangan pada Lahan

Berdasarkan hasil uji korelasi Pearson pada Tabel 4.1, suhu menunjukkan korelasi negatif yang sangat lemah dengan intensitas serangan (IS) lalat buah ( $r = -0,149$ ;  $\text{sig.} = 0,645$ ), sehingga secara statistik tidak terbukti berpengaruh nyata.

**Tabel 4.1 Tabel korelasi abiotik dengan intensitas serangan (IS) di lahan**

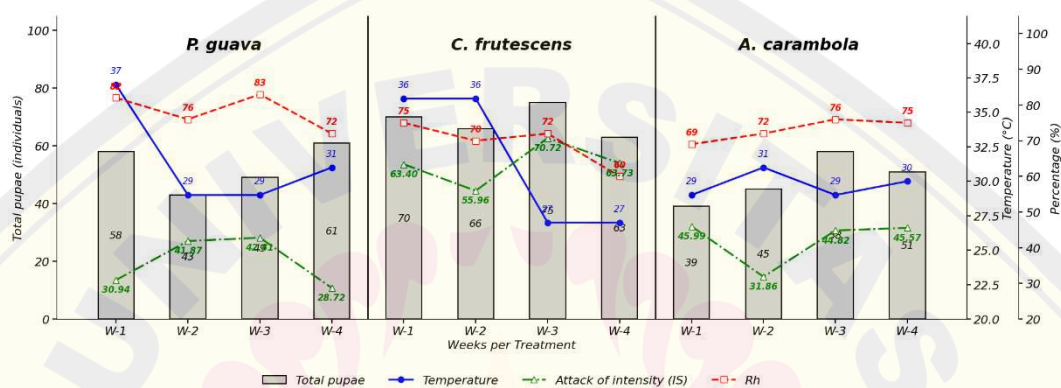
| Variabel X          | Variabel Y          | Uji korelasi            |                |
|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------|
|                     |                     | r (Pearson correlation) | Sig.(2 tailed) |
| Suhu Udara          | Intensitas Serangan | -0.149                  | 0.645          |
| Kelembapan Udara    | Intensitas Serangan | -0.45                   | 0.142          |
| Intensitas Serangan | Total pupa          | 0.637*                  | 0.026          |

Keterangan: \*nyata(signifikan) pada taraf kepercayaan 5%, \*\*nyata pada taraf kepercayaan 1%

Keberadaan inang, ketersediaan buah, dan kondisi lingkungan lainnya sering kali lebih menentukan fluktuasi populasi dan tingkat serangan di lapangan dibandingkan variasi suhu yang relatif kecil. Terdapat studi yang menyebutkan bahwa ketersediaan buah sebagai sumber daya inang berperan penting dalam menentukan populasi lalat buah, menunjukkan bahwa ketersediaan buah inang berkorelasi positif dengan populasi *Bactrocera dorsalis* ( $r = 0,89$ ), sementara buah jatuh juga menunjukkan korelasi positif ( $r = 0,80$ ) yang mana kedua faktor tersebut secara bersama-sama menjelaskan 96% variasi populasi lalat buah, menunjukkan kuatnya pengaruh ketersediaan inang terhadap populasi *B. dorsalis* (Arthikirubha et al., 2017).

Terdapat studi yang melaporkan bahwa beberapa parameter cuaca, termasuk suhu dan kelembapan tidak selalu menunjukkan hubungan yang signifikan (Bana et al., 2017). Kondisi tersebut diduga karena kisaran suhu di lokasi penelitian masih

berada dalam rentang optimum perkembangan lalat buah, sehingga aktivitas reproduksi, perkembangan, dan kelangsungan hidupnya tetap berlangsung normal (Garcia et al., 2020). Danjuma et al., (2014) melaporkan bahwa stadia pradewasa *B. carambolae* dan *B. papayae* masih mampu berkembang dan bertahan hidup pada rentang suhu tertentu, sedangkan suhu yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi baru memberikan dampak nyata terhadap laju perkembangan dan tingkat kelangsungan hidup serangga.



**Gambar 4. 1 Grafik pengamatan faktor abiotik, intensitas serangan (IS), dan total pupa di lahan pada masing-masing komoditas**

Kelembapan menunjukkan korelasi negatif dengan kekuatan sedang ( $r = -0,45$ ; sig. = 0,142), mengindikasikan kecenderungan biologis bahwa kelembapan tinggi berasosiasi dengan intensitas serangan lebih rendah, meski belum signifikan secara statistik (Gambar 4.1). Hasil ini mengindikasikan adanya kecenderungan bahwa peningkatan kelembapan diikuti oleh penurunan intensitas serangan lalat buah, meskipun pengaruhnya belum cukup kuat untuk dinyatakan nyata secara statistik. Studi lain menemukan bahwa kelembapan relatif maksimum memiliki hubungan negatif dengan populasi lalat buah (Nandre dan Shukla, 2014). Selain faktor iklim, tingkat serangan lalat buah juga sangat dipengaruhi oleh ketersediaan buah inang, tingkat kematangan buah, dan dinamika populasi lalat buah di lapangan. Kelembapan dapat memengaruhi aktivitas lalat buah secara langsung melalui perubahan kondisi mikroklimat yang memengaruhi perilaku oviposisi dan perkembangan stadia pradewasa. Selain itu, kelembapan yang tinggi juga dapat

meningkatkan keberadaan mikroorganisme patogen yang berpotensi menekan kelangsungan hidup lalat buah (Garcia et al., 2020).

Hubungan antara intensitas serangan (IS) dan total pupa menunjukkan korelasi positif yang kuat dan signifikan secara statistik ( $r = 0,637$ ;  $\text{sig.} = 0,026$ ,  $p < 0,05$ ), yang berarti semakin tinggi intensitas serangan lalat buah di lahan, semakin tinggi pula jumlah total pupa yang ditemukan (Gambar 4.1). Temuan ini sangat konsisten dengan pola yang dilaporkan dalam literatur mengenai lalat buah genus *Bactrocera*. Studi pada lalat buah *B. dorsalis* di perkebunan jambu biji Mozambik secara eksplisit menghitung indeks infestasi berbasis jumlah pupa (pupa per kilogram buah) yang muncul dari buah yang diinkubasi, kemudian mengorelasikannya dengan tingkat aktivitas/serangan lalat buah di lapangan. Hasilnya menunjukkan korelasi Pearson positif yang signifikan secara statistik antara intensitas serangan lalat buah dengan jumlah individu yang berkembang dari pupa, mengonfirmasi bahwa peningkatan serangan di lapangan sejalan dengan peningkatan jumlah pupa yang dihasilkan (Apio et al., 2026). Studi serupa juga mengemukakan bahwa indeks infestasi lalat buah dihitung dari jumlah pupa yang muncul dari sampel buah, dibagi jumlah buah yang diamati, menunjukkan bahwa nilai indeks infestasi bervariasi nyata antarjenis buah inang, yang mengindikasikan bahwa semakin tinggi kecenderungan suatu inang diserang lalat buah, semakin besar pula jumlah pupa yang dihasilkan dari buah tersebut, pola yang konsisten dengan temuan pada (Tabel 4.1) (Coelho et al., 2025).

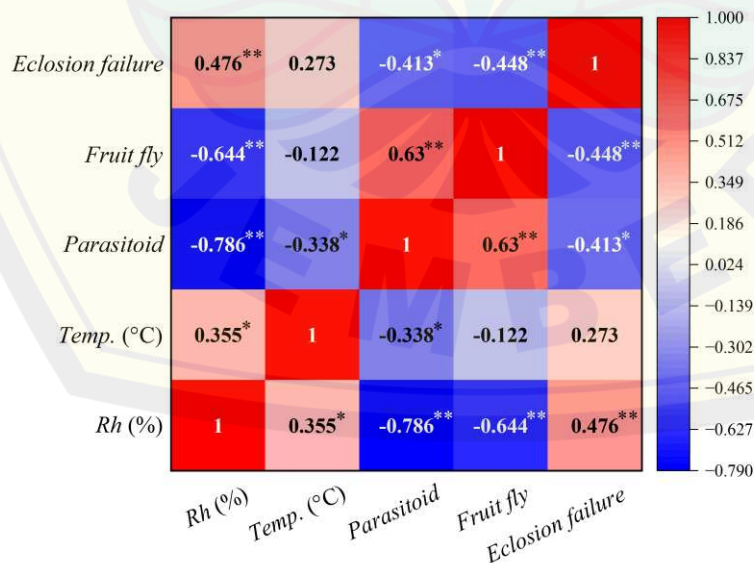
Studi diatas memperkuat hubungan biologis kuat IS dengan total pupa pada (Tabel 4.1) karena pupa merupakan hasil langsung dari proses oviposisi dan perkembangan larva akibat serangan lalat buah betina pada buah/lahan, maka semakin intensif serangan yang terjadi, semakin besar pula jumlah pupa yang terbentuk sebagai konsekuensi biologis dari proses tersebut. Jumlah pupa bukan sekadar berkorelasi secara kebetulan dengan intensitas serangan, melainkan merupakan indikator kuantitatif langsung dari keberhasilan reproduksi dan perkembangan populasi hama yang menyerang sehingga hubungan keduanya

konsisten menunjukkan signifikansi statistik baik pada penelitian ini maupun pada studi-studi internasional sejenis.

#### 4.2 Hubungan Abiotik terhadap Kemunculan Parasitoid, Lalat Buah, dan Kegagalan Eklosi pada Alat Augmentasi

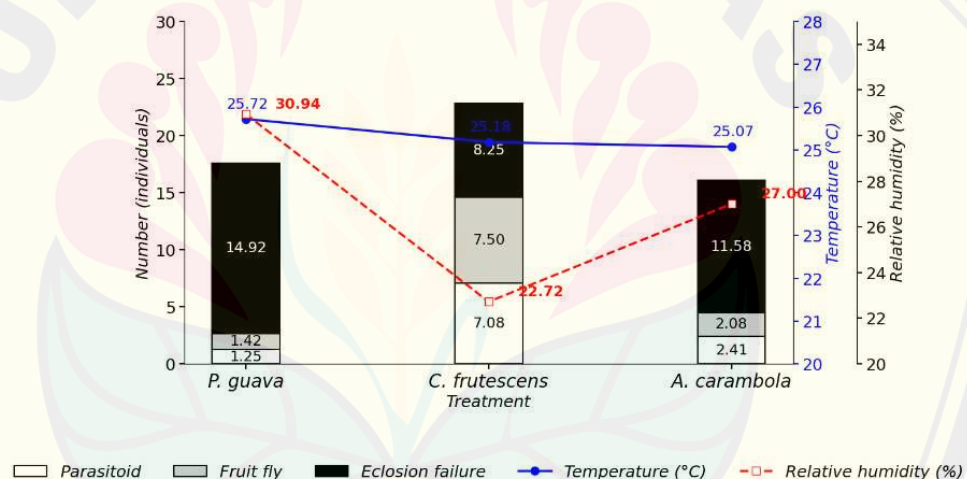
Hasil uji korelasi menunjukkan bahwa kelembapan di dalam alat augmentorium memiliki hubungan yang signifikan terhadap parasitoid, lalat buah, dan gagal eklosi. Kelembapan (RH), merupakan faktor abiotik dominan yang mengendalikan pola hasil pada ketiga inang tersebut, sebagaimana ditunjukkan oleh korelasi negatif yang sangat kuat dan signifikan antara RH dengan parasitoid ( $r = -0,786^{**}$ ) dan lalat buah ( $r = -0,644^{**}$ ), serta korelasi positif signifikan antara RH dengan kegagalan eklosi ( $r = 0,476^{**}$ ) (Gambar 4.2). Suhu di dalam alat augmentorium hanya berkorelasi lemah dan sebagian besar tidak signifikan terhadap ketiga variabel biologis tersebut ( $r = -0,338^{*}$ ) untuk parasitoid namun tidak signifikan untuk lalat buah dan kegagalan eklosi, sehingga meskipun garis suhu tampak menonjol secara visual, perannya sesungguhnya minor dalam menjelaskan variasi hasil (Gambr 4.2). Kondisi tersebut sejalan dengan yang melaporkan bahwa suhu tidak berpengaruh nyata terhadap populasi lalat buah, sedangkan ketersediaan buah menunjukkan hubungan yang kuat dengan populasi lalat buah (Muhlison et al., 2026).

Correlation matrix of abiotic factor and biological response variables



**Gambar 4.2** Grafik *heatmap* korelasi abiotik dengan kemunculan parasitoid, lalat buah, dan kegagalan eklosi (Keterangan: \*nyata(signifikan) pada taraf kepercayaan 5%, \*\*nyata pada taraf kepercayaan 1%)

Korelasi negatif antara kelembapan dengan jumlah parasitoid yang muncul sejalan dengan temuan yang melaporkan bahwa aktivitas *F. arisanus* dipengaruhi secara nyata oleh suhu dan kelembapan (Quilici & Rousse, 2012). Jumlah keturunan, tingkat kemunculan imago, dan bobot imago *F. arisanus* tertinggi diperoleh pada suhu 25°C, yang mengindikasikan bahwa suhu tersebut merupakan kondisi optimal bagi perkembangan parasitoid ini. Dalam penelitian ini, suhu inkubasi berkisar antara 24–26,5°C, yang masih berada di sekitar kisaran optimal tersebut. Namun, variasi suhu yang disertai kelembapan tinggi diduga tetap memengaruhi efisiensi perkembangan parasitoid secara keseluruhan.



**Gambar 4.3** Grafik faktor abiotik dengan kemunculan parasitoid dan lalat buah serta kegagalan eklosi pada tiap komoditas

Grafik ini menampilkan hasil akhir kemunculan (eklosi) parasitoid dan lalat buah pada tiga jenis buah inang jambu kristal (*P. guava*), cabai rawit (*C. frutescens*), dan belimbing (*A. carambola*) dalam bentuk batang bertumpuk (parasitoid, lalat buah, dan kegagalan eklosi), disertai rata-rata suhu dan kelembapan harian selama masa inkubasi (garis). Secara keseluruhan, pola data menunjukkan adanya gradien kelembapan yang berbanding lurus dengan tingkat

kegagalan eklosi dan berbanding terbalik dengan keberhasilan kemunculan parasitoid maupun lalat buah, sementara suhu relatif stabil (25,07–25,72°C) dan tidak menunjukkan variasi yang cukup besar untuk dapat menjelaskan perbedaan hasil antar-komoditas (Gambar 4.3).

Pada jambu kristal, kelembapan rata-rata tercatat paling tinggi di antara ketiga perlakuan (30,94%), dan sejalan dengan itu, kegagalan eklosi juga menjadi yang paling dominan, yaitu 14,92 individu atau sekitar 85% dari total individu yang dihasilkan pada media ini. Sementara itu, kemunculan parasitoid (1,25 individu) dan lalat buah (1,42 individu) tercatat sangat rendah, bahkan menjadi yang terendah di antara ketiga komoditas. Tingginya kegagalan eklosi yang disertai rendahnya kemunculan kedua kelompok organisme secara bersamaan ini mengindikasikan bahwa kelembapan tinggi pada jambu kristal tidak hanya menghambat perkembangan pupa lalat buah sebagai hama, tetapi juga turut menekan keberhasilan perkembangan pupa parasitoid sebagai musuh alaminya. Kondisi ini sejalan dengan pernyataan Li et al., (2024) bahwa kelembapan ekstrem dapat menurunkan tingkat kemunculan parasitoid secara signifikan akibat terganggunya proses fisiologis pupa serangga, sehingga menghambat keberhasilan eklosi baik pada inang maupun parasitoidnya.

Pola yang berlawanan secara konsisten ditunjukkan oleh cabai rawit, yang memiliki kelembapan rata-rata paling rendah (22,72%) di antara ketiga komoditas. Pada kondisi ini, kegagalan eklosi tercatat paling rendah (8,25 individu atau  $\pm 36\%$  dari total), sementara kemunculan parasitoid (7,08 individu) dan lalat buah (7,50 individu) justru menjadi yang tertinggi, bahkan mencapai lebih dari lima kali lipat dibandingkan jambu kristal untuk kedua variabel tersebut (Gambar 4.3). Temuan ini memperkuat indikasi bahwa kelembapan yang lebih rendah dan terkendali menciptakan lingkungan mikro di dalam buah yang lebih mendukung proses metamorfosis pupa menjadi imago, sehingga baik populasi hama maupun musuh alaminya dapat berkembang secara optimal. Hal ini juga relevan dengan studi pernyataan Jing et al. (2019) bahwa perkembangan intrapuparial *B. dorsalis* sangat

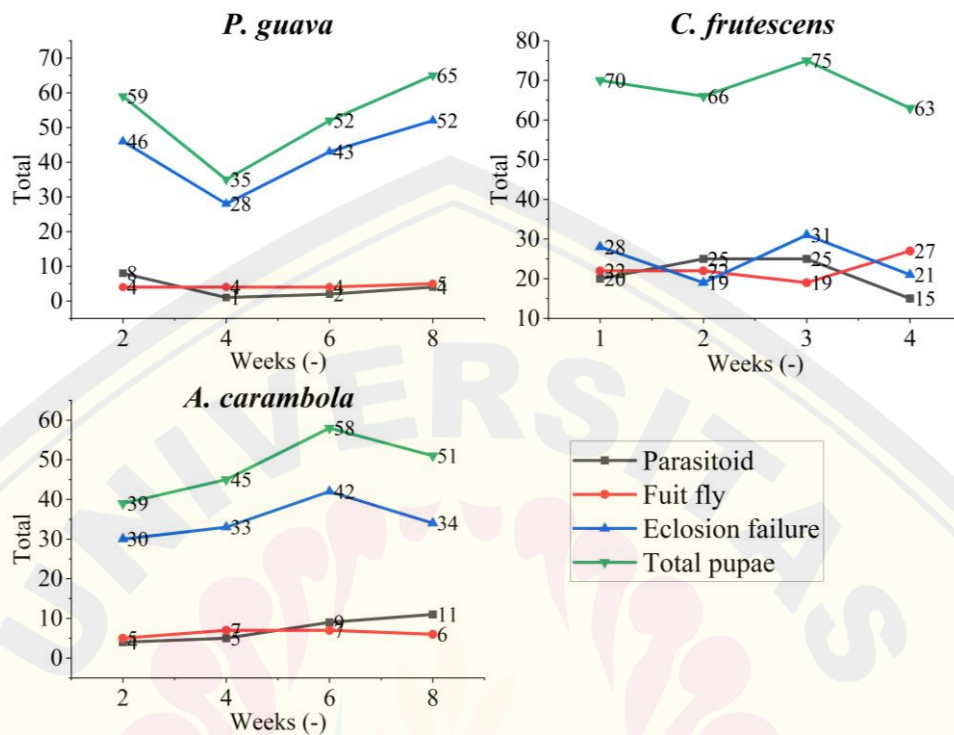
dipengaruhi oleh kondisi suhu dan kelembapan, di mana kombinasi keduanya yang sesuai akan mendukung keberhasilan proses eklosi (Jing *et al.* 2019).

Belimbing menunjukkan posisi menengah pada seluruh variabel, dengan kelembapan rata-rata sebesar 27,00%, kegagalan eklosi 11,58 individu ( $\pm 72\%$  dari total), serta kemunculan parasitoid (2,41 individu) dan lalat buah (2,08 individu) yang juga berada di antara nilai jambu kristal dan cabai rawit (Gambar 4.3). Posisi belimbing yang konsisten berada di tengah pada seluruh variabel, baik abiotik (kelembapan) maupun biologis (kegagalan eklosi, parasitoid, lalat buah), memperkuat adanya pola dosis-respons yang jelas: semakin tinggi kelembapan rata-rata suatu media inkubasi, semakin tinggi pula tingkat kegagalan eklosinya, dan semakin rendah keberhasilan kemunculan parasitoid maupun lalat buah. Hal ini sejalan dengan studi terbaru pada pupa *B. dorsalis* yang menyatakan bahwa temperatur, kelembapan, dan ketersediaan makanan tampak memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap durasi stadium pupa dibandingkan faktor-faktor seperti posisi tubuh, kedalaman, komposisi tanah, dan pH (Chen *et al.*, 2024). Pola gradien tiga-titik ini (jambu kristal–belimbing–cabai rawit, dari RH tertinggi ke terendah) memberikan bukti visual yang kuat bahwa kelembapan bukan sekadar berkorelasi secara statistik, melainkan juga menunjukkan hubungan yang konsisten secara bertahap (monotonik) dengan seluruh variabel respons biologis yang diamati.

#### 4.3 Dinamika Populasi serta Fluktuasi Kegagalan Eklosi dan Total Pupa

Dinamika populasi dalam penelitian menunjukkan bahwa dinamika populasi lalat buah, parasitoid, pupa gagal eklosi, dan total pupa berbeda pada setiap jenis buah inang. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik buah inang memengaruhi keberhasilan infestasi, perkembangan larva, pembentukan pupa, serta keberhasilan munculnya imago lalat buah maupun parasitoid. Selain faktor inang, keberadaan parasitoid dan faktor lingkungan juga berperan dalam menentukan tingkat keberhasilan perkembangan lalat buah (Agboka *et al.*, 2024). Menurut Chen *et al.*, (2018), kegagalan perkembangan pupa dapat disebabkan oleh gangguan

fisiologis akibat parasitisasi, kualitas inang, maupun faktor lingkungan yang memengaruhi perkembangan serangga selama fase metamorfosis.



**Gambar 4.4** Gambar dinamika populasi parasitoid dan lalat buah serta total pupa dan kegagalan eklosi pada masing-masing komoditas (jambu air, cabai rawit, dan belimbing)

Pada jambu kristal, total pupa berfluktuasi dari 59 individu pada minggu ke-2 menjadi 35 individu pada minggu ke-4, kemudian meningkat kembali hingga mencapai 65 individu pada minggu ke-8. Meskipun jumlah pupa relatif tinggi, jumlah lalat buah yang berhasil muncul hanya berkisar 4–5 individu, sedangkan pupa gagal eklosi mencapai 28–52 individu (Gambar 4.4). Tingginya jumlah pupa yang diperoleh menunjukkan bahwa buah jambu biji merupakan inang yang sesuai bagi perkembangan larva lalat buah. Larva yang berkembang di dalam daging buah mampu menyelesaikan fase makan dan bermetamorfosis menjadi pupa dalam jumlah yang tinggi. Rendahnya kemunculan imago menunjukkan bahwa sebagian besar pupa yang terbentuk tidak mampu menyelesaikan perkembangan hingga fase dewasa. Keberhasilan perkembangan pradewasa pada lalat buah sangat dipengaruhi oleh kualitas inang (Roy, 2021). Sebaliknya, jumlah parasitoid yang muncul dari

jambu kristal relatif rendah, yaitu hanya 1–8 individu. Rendahnya kemunculan parasitoid mengindikasikan bahwa proporsi larva yang mengalami parasitasi lebih kecil dibandingkan larva yang berhasil berkembang menjadi lalat buah dewasa. Kondisi serupa dilaporkan dalam studi yang menunjukkan bahwa tingkat kemunculan parasitoid umumnya lebih rendah dibandingkan kemunculan lalat buah karena keberhasilan perkembangan parasitoid sangat bergantung pada kesesuaian inang dan kondisi lingkungan selama perkembangan (Layodé et al., 2020).

Buah cabai rawit menghasilkan total pupa tertinggi dibandingkan dua inang lainnya, yaitu berkisar antara 63–75 pupa (Gambar 4.4). Tingginya jumlah pupa menunjukkan bahwa buah cabai mengalami infestasi larva lalat buah yang cukup tinggi selama periode pengambilan sampel. Jumlah lalat buah yang berhasil muncul hanya berkisar antara 19–31 individu, jauh lebih rendah dibandingkan jumlah total pupa yang diperoleh. Sebaliknya, jumlah pupa gagal eklosi relatif tinggi, yaitu 19–31 individu (Gambar 4.4). Tingginya proporsi pupa gagal eklosi menunjukkan bahwa tidak seluruh larva yang berhasil membentuk pupa mampu menyelesaikan metamorfosis menjadi imago. Syamsudin et al., (2022) menjelaskan bahwa karakteristik fisik dan kimia buah cabai dapat memengaruhi kualitas inang sehingga berdampak pada keberhasilan perkembangan larva dan pupa sehingga berpengaruh terhadap tingkat infestasi *B. dorsalis*. Jumlah parasitoid yang muncul dari pupa cabai rawit berkisar antara 15–25 individu, lebih tinggi dibandingkan pada jambu biji maupun belimbing. Tingginya kemunculan parasitoid menunjukkan bahwa larva lalat buah yang berkembang pada buah cabai merupakan inang yang cukup sesuai bagi perkembangan parasitoid. Populasi parasitoid umumnya meningkat seiring meningkatnya ketersediaan inang karena parasitoid memerlukan larva atau pupa lalat buah sebagai sumber daya untuk reproduksi (Gonçalves et al., 2017).

Pada buah belimbing, total pupa meningkat dari 39 individu pada minggu ke-2 menjadi 58 individu pada minggu ke-6 sebelum menurun menjadi 51 individu pada minggu ke-8. Jumlah parasitoid meningkat secara bertahap dari 4 individu menjadi 11 individu selama periode pengamatan. Belimbing diketahui merupakan salah satu inang utama *B. carambolae*. Lalat buah *B. carambolae* mampu

menyelesaikan siklus hidupnya dengan baik pada buah belimbing dan menunjukkan tingkat fekunditas yang tinggi pada inang tersebut (Castilho et al., 2019). Keberadaan total pupa yang cukup tinggi pada penelitian ini menunjukkan bahwa belimbing menyediakan kondisi yang sesuai untuk perkembangan lalat buah. Peningkatan jumlah parasitoid yang mengikuti peningkatan total pupa menunjukkan adanya hubungan ketergantungan antara parasitoid dan inang. Jumlah pupa gagal eklosi (Gambar 4.4) yang tetap tinggi menunjukkan bahwa fase pupa merupakan stadia yang paling rentan terhadap berbagai faktor mortalitas. Selain parasitisasi, kualitas inang dan kondisi lingkungan selama perkembangan pupa juga dapat memengaruhi keberhasilan eklosi.

Perbandingan dinamika populasi antar ketiga tanaman inang menunjukkan pola yang berbeda secara substansial. Cabai rawit (*C. frutescens*) secara konsisten menghasilkan total pupa tertinggi sepanjang periode pengamatan, diikuti belimbing (*A. carambola*) dan jambu kristal (*P. guajava*). Perbedaan ini mencerminkan tingkat kesesuaian masing-masing tanaman sebagai inang larva lalat buah, yang dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kandungan nutrisi buah (Syamsudin et al., 2022). Selain dengan tingkat kesesuaian buah secara fisik dan kandungan nutrisi, urutan tersebut sesuai dengan urutan abiotik kelembapan yang mana kelembapan terendah didapatkan pada cabai rawit, kemudian diikuti dengan belimbing, dan jambu kristal (Tabel 4.2). Fluktuasi jumlah total pupa antar minggu pengamatan pada ketiga inang kemungkinan berkaitan dengan ketersediaan buah matang di lapangan pada masing-masing periode pengambilan sampel dan juga kondisi abiotik selama masa inkubasi.

#### **4.4 Pengaruh Faktor Jenis Buah dan Bobot Buah terhadap Kemunculan Parasitoid, Lalat Buah, dan Kegagalan Eklosi**

Rahmawati et al., (2024) yang melaporkan bahwa tingkat parasitasi *Opius* sp. pada lalat buah *Bactrocera* spp. di berbagai varietas jeruk di Malang mencapai 13–69%, yang menunjukkan bahwa jenis buah inang secara dominan memengaruhi efektivitas parasitoid. Studi lain membuktikan bahwa *B. latifrons* menunjukkan preferensi oviposisi yang berbeda nyata antar jenis buah dalam famili Solanaceae, di mana cabai rawit dan cabai besar menjadi inang yang paling disukai

dibandingkan jenis Solanaceae lainnya, yang secara langsung memengaruhi populasi larva yang tersedia bagi parasitoid (Rattanapun et al., 2021).

Tingkat kelembapan optimal bagi perkembangan pupa *B. dorsalis* dan *B. carambolae* berkisar antara 10–30 sehingga bobot buah yang lebih besar berpotensi meningkatkan kelembapan augmentorium melebihi batas optimal dan meningkatkan kegagalan eklosi. Tempat pupasi yang tidak sesuai akibat kelembapan tinggi ini meningkatkan risiko mengurangi perlindungan dari kekeringan dan suhu, sehingga berdampak buruk pada tingkat kelangsungan hidup larva maupun kepompong (Susanto et al., 2022). Keberhasilan parasitoid dalam memarasitasi inang juga dipengaruhi oleh ukuran buah karena buah yang terlalu besar atau berdaging tebal dapat menghambat penetrasi ovipositor parasitoid, yang mengindikasikan bahwa lokasi inang di dalam buah merupakan faktor kritis yang membatasi keberhasilan parasitasi (Quilici & Rousse, 2012).

#### 4.4.1. Pengaruh faktor jenis buah

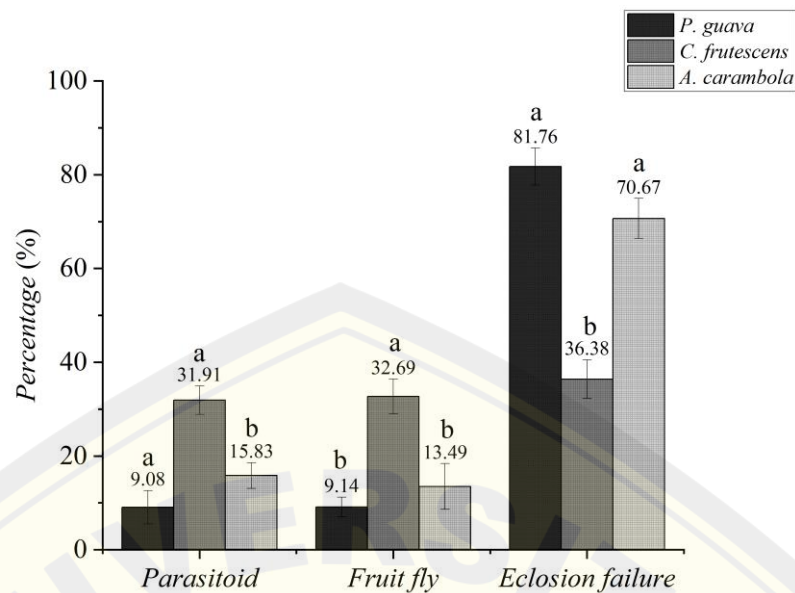
Hasil uji lanjut *Duncan* menunjukkan bahwa cabai rawit (*C. frutescens*) menghasilkan kemunculan parasitoid (31,92%) dan kemunculan lalat buah (32,69%) tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan jambu kristal (*P. guava*) maupun belimbing (*A. carambola*) (Gambar 4.5). Tingginya kemunculan parasitoid pada cabai rawit berkaitan erat dengan karakteristik fisik sehingga memudahkan penetrasi ovipositor parasitoid ke dalam jaringan buah untuk memarasitasi larva lalat buah. Tingginya kemunculan lalat buah pada cabai rawit juga dikonfirmasi oleh studi yang melaporkan bahwa *C. frutescens* merupakan inang yang paling disukai oleh lalat buah dibandingkan jenis Solanaceae lainnya, dengan jumlah pupa per gram buah tertinggi, sehingga populasi larva yang lebih padat pada buah cabai secara langsung mendukung kemunculan lalat buah maupun parasitoidnya yang lebih tinggi (Rattanapun et al., 2021). Perbedaan populasi lalat buah antar komodita berkaitan dengan ketersediaan buah sebagai sumber daya inang (Muhlison et al., 2021).

**Tabel 4. 2 Tabel pengaruh jenis buah terhadap abiotik (suhu dan kelembapan media didalam augmentorium)**

| Perlakuan     | Parameter       |                      |
|---------------|-----------------|----------------------|
| Jenis buah    | Suhu (Mean±SE)  | Kelembapan (Mean±SE) |
| Jambu kristal | 25.718 ± 0.139a | 31.625 ± 0.666a      |
| Cabai rawit   | 25.178 ± 0.198b | 22.719 ± 0.492c      |
| Belimbing     | 25.198 ± 0.144b | 29 ± 0.826b          |

Keterangan: Angka pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Duncan taraf 5%\* (dibandingkan antar jenis buah)

Pada jambu kristal (*P. guava*) menunjukkan nilai gagal eklosi tertinggi (81,76%) dan berbeda nyata dengan cabai rawit (36,38%), sementara belimbing berada pada posisi menengah (70,67%) namun tidak berbeda nyata dengan jambu kristal. Tingginya gagal eklosi pada jambu kristal diduga berkaitan dengan kandungan air yang tinggi pada daging buah jambu yang membusuk, sehingga meningkatkan kelembapan di dalam augmentorium melebihi batas optimal. Kelembapan media yang tinggi menyebabkan pupa *B. carambolae* dan *B. dorsalis* tidak mampu bertahan hidup, dan kondisi terlalu basah akibat dekomposisi daging buah jambu yang berair dapat menciptakan lingkungan yang tidak kondusif bagi eklosi pupa. Tingginya gagal eklosi pada belimbing juga dapat dikaitkan dengan karakteristik fisik dan kimia pada *A. carambola* yang berpotensi memengaruhi viabilitas larva pada belimbing yang merupakan inang utama *B. carambolae* namun tidak dapat menunjang pertumbuhan larva *B. dorsalis* secara optimal karena kandungan kimianya yang spesifik (Koswanudin et al., 2018).



**Gambar 4.5** Grafik hasil kemunculan parasitoid, lalat buah, dan kegagalan eklosi pada berbagai jenis buah (Keterangan: Angka pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Duncan taraf 5%\* (dibandingkan antar jenis buah) dibandingkan antar jenis buah/berdasarkan warna yang sama)

Rendahnya parasitoid pada jambu kristal (9,08%) dan belimbing (15,83%) dibandingkan cabai rawit (31,92%) memberikan implikasi penting dalam konteks efektivitas augmentorium (Gambar 4.5). Komoditas hortikultura di Jawa Timur, tingkat parasitasi *Fopius* spp. berbeda nyata antar jenis buah (Setiawan et al., 2024). Jambu kristal dan belimbing menunjukkan bahwa kondisi kelembapan tinggi (Tabel 4.2). Perkembangan intrapuparial *B. dorsalis* sangat dipengaruhi oleh kondisi suhu dan kelembapan, di mana perkembangan pupa dapat digunakan untuk memprediksi waktu kemunculan lalat buah (Jing et al. 2019). Pada *B. dorsalis*, keberhasilan perkembangan intrapuparial hingga kemunculan imago sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan selama fase pupa (Chen et al., 2024) Kondisi kelembapan tersebut memiliki hubungan dengan tingkat kegagalan kemuculan imago.

Cabai rawit merupakan komoditas paling optimal untuk program augmentorium karena menghasilkan kemunculan parasitoid tertinggi sekaligus gagal eklosi terendah, sehingga augmentorium dengan jaring penyekat 1,5 mm

sebagaimana direkomendasikan Muhlison et al., (2026) paling efektif diterapkan pada komoditas ini dalam kerangka PHT.

#### 4.4.2. Pengaruh faktor bobot pada tiap jenis buah

**Tabel 4.3 Tabel pengaruh bobot terhadap (suhu dan kelembapan media di dalam augmentorium)**

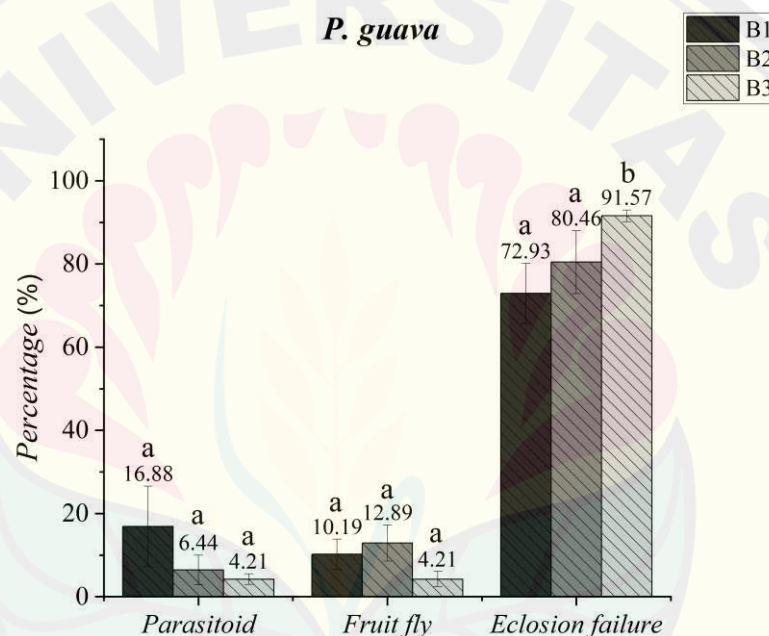
|               |        | Parameter            |                            |
|---------------|--------|----------------------|----------------------------|
|               |        | Suhu (Mean $\pm$ SE) | Kelembaban (Mean $\pm$ SE) |
| Jambu Kristal | Ringan | 26.03 $\pm$ 0.11a    | 29.41 $\pm$ 0.51a          |
|               | Sedang | 25.41 $\pm$ 0.21a    | 31.94 $\pm$ 0.47ab         |
|               | Berat  | 25.72 $\pm$ 0.30a    | 33.53 $\pm$ 1.23b          |
| Cabai Rawit   | Ringan | 24.89 $\pm$ 0.11a    | 22.06 $\pm$ 0.83a          |
|               | Sedang | 24.97 $\pm$ 0.06a    | 22.31 $\pm$ 0.87a          |
|               | Berat  | 25.88 $\pm$ 0.40b    | 23.78 $\pm$ 0.79a          |
| Belimbing     | Ringan | 25.00 $\pm$ 0.41a    | 28.91 $\pm$ 1.28a          |
|               | Sedang | 25.13 $\pm$ 0.14a    | 28.19 $\pm$ 1.50a          |
|               | Berat  | 25.47 $\pm$ 0.09a    | 29.91 $\pm$ 1.77a          |

Keterangan: Angka pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Duncan taraf 5%\* (dibandingkan antar variasi bobot dalam tiap jenis buah)

Kondisi suhu dan kelembapan di dalam augmentorium menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh kombinasi jenis komoditas hortikultura dan bobot buah yang diinkubasi. Pada jambu kristal peningkatan bobot buah dari kategori ringan menuju berat diikuti peningkatan kelembapan relatif dari 29,41 $\pm$ 0,51% menjadi 33,53 $\pm$ 1,23% (Tabel 4.3). Sebaliknya, pada cabai rawit, kelembapan internal relatif lebih rendah dan stabil pada kisaran 22,06–23,78% (Tabel 4.3).

Karakteristik fisik dan dinamika dekomposisi masing-masing komoditas berperan dalam membentuk mikroklimat internal augmentorium. Kondisi ruang di dalam augmentorium menghasilkan kondisi lingkungan yang lebih ditentukan oleh interaksi antara biomassa, ventilasi, dan pelepasan uap air dibandingkan kondisi atmosfer luar. Kondisi mikro yang terbentuk di dalam augmentorium diketahui menjadi faktor penting yang menentukan keberhasilan pelepasan parasitoid sekaligus retensi lalat buah (Desurmont et al., 2022). Kondisi tersebut berpotensi menurunkan efisiensi pertukaran udara dan mengubah kondisi media pupasi.

Fungsi lapisan pasir setebal 10 cm pada penelitian ini diduga membantu menjaga kestabilan media dengan memisahkan puparium dari jaringan buah yang mengalami pelunakan. Lapisan pasir setebal 10 cm pada dasar augmentorium berfungsi sebagai media pemisah dan penyerap rembesan hasil pelunakan jaringan buah. Namun ketika kapasitas buah meningkat, kemampuan sistem mempertahankan kondisi mikro yang stabil kemungkinan menurun. Faktor lingkungan selama fase perkembangan diketahui memengaruhi kualitas perkembangan serangga dan keberhasilan metamorfosis organisme parasitoid (Lin et al., 2021; Ode et al., 2022).



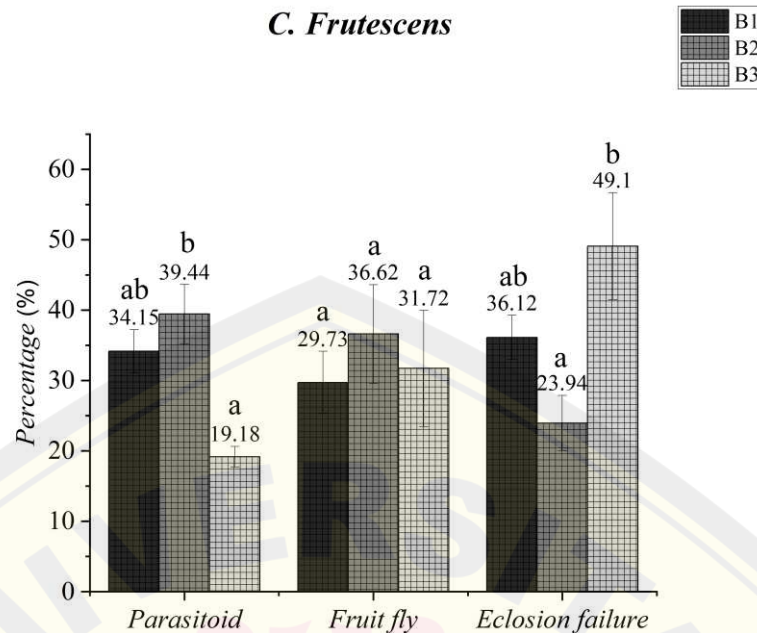
**Gambar 4.6** Tabel hasil kemunculan parasitoid, lalat buah, dan kegagalan eklosi pada jambu kristal (Keterangan: Angka pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Duncan taraf 5%\* dibandingkan pada warna yang sama/tiap bobot B1:ringan, B2:sedang B3:berat)

Pada komoditas jambu kristal, kegagalan eklosi mendominasi seluruh tingkat perlakuan bobot dengan nilai tertinggi pada perlakuan B3 sebesar  $91,58 \pm 1,41\%$  (Gambar 4.6). Kondisi ini diikuti oleh rendahnya persentase kemunculan parasitoid dan lalat buah. Pola tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah biomassa buah tidak selalu menghasilkan kondisi yang mendukung perkembangan atau sebaliknya. Jambu kristal memiliki jaringan buah

relatif tebal dan kandungan air tinggi sebesar 87-89.30% (Mufza et al., 2025). Selama proses pelunakan jaringan diduga menghasilkan kondisi mikro yang lebih lembap dibandingkan komoditas lain. Keberhasilan perkembangan parasitoid dipengaruhi oleh kondisi lingkungan selama fase perkembangan, terutama pada fase transisi menuju kemunculan imago (Ode et al., 2022). Lingkungan perkembangan yang berubah dapat menghambat transisi fase pupa menuju imago dan menurunkan keberhasilan eklosi.

Fase pupa merupakan tahap kritis pada perkembangan lalat buah karena terjadi proses metamorfosis menuju imago. Perubahan kondisi lingkungan, terutama kelembapan, dapat memengaruhi viabilitas pupa dan keberhasilan eklosi pada kelompok Tephritidae. Pada *B. dorsalis*, keberhasilan perkembangan intrapuparial hingga kemunculan imago sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan selama fase pupa (Chen et al., 2024). Hal ini menjelaskan bahwa meskipun jambu kristal mampu mendukung pembentukan pupa dalam jumlah tinggi, tidak seluruh pupa mampu menyelesaikan perkembangan hingga fase dewasa. Tingginya angka kegagalan eklosi pada komoditas ini berkaitan erat dengan kandungan air daging buah yang tinggi, sehingga proses dekomposisi menghasilkan akumulasi kelembapan di dalam ruang augmentorium melebihi batas optimal. Susanto et al., (2022) melaporkan bahwa kelembapan media yang terlalu tinggi menyebabkan pupa *B. carambolae* dan *B. dorsalis* tidak mampu bertahan hidup.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kelembapan tidak hanya memengaruhi organisme secara langsung tetapi juga dapat mengubah hubungan trofik antara inang dan parasitoid melalui perubahan fisiologi perkembangan masing-masing organisme (Li et al., 2024). Perubahan kondisi biologis inang selama fase perkembangan juga dapat mengubah interaksi internal yang mendukung perkembangan parasitoid. Studi pada *B. dorsalis* menunjukkan bahwa keberadaan parasitoid dapat mengubah kondisi biologis dan mikrobiologis inang selama perkembangan, yang selanjutnya dapat memengaruhi kualitas hasil perkembangan organisme yang muncul (Gwokalya et al., 2024).

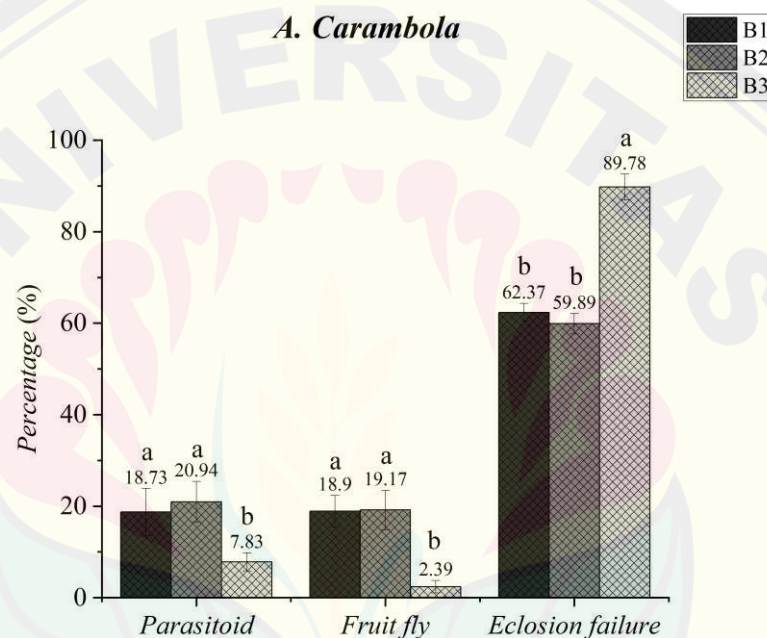


Gambar 4.7 Tabel hasil kemunculan parasitoid, lalat buah, dan kegagalan eklosi pada cabai rawit (Keterangan: Angka pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji Duncan taraf 5%\* dibandingkan pada warna yang sama/tiap bobot B1:ringan, B2:sedang B3:berat)

Pada cabai rawit, pola perkembangan berbeda dibandingkan jambu kristal, dimana persentase kemunculan parasitoid tertinggi ditemukan pada perlakuan B2 sebesar  $39,44 \pm 4,20\%$  dengan tingkat kegagalan eklosi terendah sebesar  $23,96 \pm 3,94\%$  (Gambar 4.7). Kondisi ini menunjukkan bahwa bobot buah sedang memberikan lingkungan perkembangan yang lebih sesuai bagi hubungan inang–parasitoid. Jumlah pupa yang berkembang tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan buah sebagai sumber nutrisi, tetapi juga oleh kondisi mikrohabitat selama fase pradewasa.

Rendahnya kegagalan eklosi pada B2 diduga berkaitan dengan kondisi kelembapan yang lebih mendukung proses perkembangan. Media pasir dengan kondisi kelembapan yang sesuai dapat mempertahankan aerasi dan ruang pori sehingga mendukung proses pembentukan puparium serta perkembangan pupa. Sebaliknya, kondisi kelembapan yang terlalu tinggi dapat menurunkan keberhasilan hidup pupa karena memengaruhi lokasi pupasi, lama perkembangan, dan

keberhasilan kemunculan dewasa. Pada *B. dorsalis*, kondisi kelembapan substrat diketahui berpengaruh terhadap tingkat kelangsungan hidup dan kemunculan imago, dengan kondisi kelembapan tertentu menghasilkan tingkat eklosi yang lebih optimal (Bohua et al., 2006). Tingginya kemunculan parasitoid pada B2 juga berkaitan dengan ketersediaan inang yang sesuai. Cabai rawit merupakan salah satu inang yang mendukung perkembangan *B. dorsalis*, dimana karakteristik fisik dan kimia buah dapat memengaruhi keberhasilan infestasi serta perkembangan pradewasa lalat buah (Syamsudin et al., 2022).



**Gambar 4.8** Tabel hasil kemunculan parasitoid, lalat buah, dan kegagalan eklosi pada belimbing ( Keterangan: Angka pada kolom yang diikuti dengan huruf yang sama, menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji dDuncan taraf 5%\* dibandingkan pada warna yang sama/tiap bobot B1:ringan, B2:sedang B3:berat)

Pada komoditas belimbing, efektivitas augmentorium terlihat pada perlakuan bobot ringan dan sedang, namun menurun drastis pada bobot berat. Persentase kegagalan eklosi meningkat hingga  $89,78 \pm 2,81\%$  pada B3 (Gambar 4.8). Belimbing mengandung air yang tinggi sehingga peningkatan jumlah buah mempercepat perubahan kondisi mikro menjadi lebih lembap .Studi terbaru menjelaskan bahwa belimbing memiliki kandungan air sebesar 90.38% (Hidayana et al., 2022). Akumulasi kelembapan tersebut dapat mengubah kondisi lingkungan

perkembangan dan memengaruhi keberhasilan transformasi fase pupa menjadi imago.

Keberadaan parasitoid pada buah belimbing berkaitan erat dengan hubungan ekologis antara parasitoid ini dengan *B. carambolae* yang merupakan hama utama belimbing. Laporan dari studi mengemukakan bahwa *Fopius sp.* dan *Psytalia sp.* merupakan parasitoid yang berasosiasi dengan *B. carambolae* yang menyerang buah belimbing, dan *Fopius sp.* tercatat sebagai salah satu parasitoid dominan pada buah-buahan yang terinfestasi *B. carambolae* di kawasan Asia Tenggara (Shariff et al., 2014). Rendahnya jumlah parasitoid yang muncul, khususnya pada B3, mengindikasikan bahwa kondisi kelembapan yang terlalu tinggi selama inkubasi kurang optimal bagi keberhasilan perkembangan Parasitoid hingga fase kemunculan. Faktor suhu, kelembapan, dan kualitas inang diketahui berperan dalam menentukan perkembangan serta keberhasilan reproduksi parasitoid yang menyerang lalat buah (Lin et al., 2021).

Kondisi abiotik yang tidak sesuai ketika inkubasi dapat mengganggu proses fisiologis pupa serangga sehingga menghambat keberhasilan eklosi. Secara mekanis, kelembapan tinggi memenuhi ruang pori media dengan air sehingga membatasi difusi oksigen dan memicu kondisi hipoksia. Sebagai bentuk adaptasi, pupa meresponsnya dengan menekan laju respirasi dan kebutuhan oksigen, sehingga proses metabolismenya melambat tanpa menurunkan tingkat kelangsungan hidupnya. (Wang et al., 2019). Keberhasilan augmentasi parasitoid pada augmentorium sangat bergantung pada kemampuan sistem mempertahankan kondisi lingkungan yang masih mendukung perkembangan serangga sambil tetap menghambat keluarnya hama target (Desurmont et al., 2022). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pembatasan kapasitas buah menjadi faktor penting dalam mempertahankan efektivitas augmentorium pada komoditas dengan kadar air tinggi.

#### 4.4.3. Efektivitas augmentorium

Efektivitas augmentorium sebagai perangkat terpadu antara sanitasi dan augmentasi parasitoid dalam penelitian ini dievaluasi berdasarkan kemampuan alat

dalam menahan lalat buah, meloloskan parasitoid, serta menekan kegagalan eklosi pada berbagai komoditas hortikultura. Secara keseluruhan, augmentorium terbukti mampu menjalankan fungsi ganda tersebut, meskipun tingkat efektivitasnya bervariasi bergantung pada jenis komoditas dan bobot buah yang diinkubasi. Hasil ini selaras dengan prinsip augmentorium yang dikemukakan Kehrli et al., (2005), bahwa efektivitas alat bergantung pada kemampuan jaring penyekat menahan imago lalat buah sekaligus meloloskan parasitoid yang berukuran lebih kecil. Pada penelitian ini, jaring penyekat berukuran 1,5 mm digunakan sebagai rekomendasi dari Muhlison et al., (2026) yang telah memvalidasi ukuran tersebut sebagai optimal pada pertanaman cabai rawit di Jember.

Jambu kristal (*P. guajava*) menunjukkan efektivitas augmentorium yang paling rendah, ditandai dengan tingginya kegagalan eklosi yang mencapai 81,76% rata-rata seluruh perlakuan bobot. Hal ini dikarenakan faktor dan jumlah buah yang mempengaruhi kegagalan eklosi tersebut. Kondisi demikian secara langsung menurunkan kemampuan pupa untuk menyelesaikan metamorfosis dan mengakibatkan kegagalan eklosi massal. Walaupun demikian, augmentorium tetap mampu meloloskan 100% parasitoid *Fopius sp.* dan *Trichopria sp.*, yang mengindikasikan bahwa fungsi konservasi parasitoid masih berjalan meski tidak optimal. Cabai rawit (*C. frutescens*) menunjukkan performa terbaik dalam mendukung fungsi augmentorium. Persentase kemunculan parasitoid tertinggi diperoleh pada perlakuan bobot sedang (B2) sebesar  $39,44 \pm 4,20\%$  dengan tingkat kegagalan eklosi terendah di antara seluruh kombinasi perlakuan, yaitu  $23,96 \pm 3,94\%$  (Gambar 4.8).. Belimbing (*A. carambola*) berada pada posisi menengah dalam hal efektivitas augmentorium. Kemunculan parasitoid masih tergolong baik pada perlakuan bobot ringan dan sedang, namun menurun drastis pada bobot berat (B3) dengan kegagalan eklosi mencapai  $89,78 \pm 2,81\%$  (Gambar 4.8). Augmentorium terbukti efektif sebagai strategi pengendalian hayati augmentatif, terutama dalam mengonservasi dan melepaskan parasitoid indigenus yang telah memarasit larva lalat buah di lapangan. Pola ini mencerminkan bahwa efektivitas augmentorium sangat dipengaruhi oleh kapasitas muatan buah di dalam ruang inkubasi. Desurmout et al., (2022) menegaskan bahwa kondisi mikro di

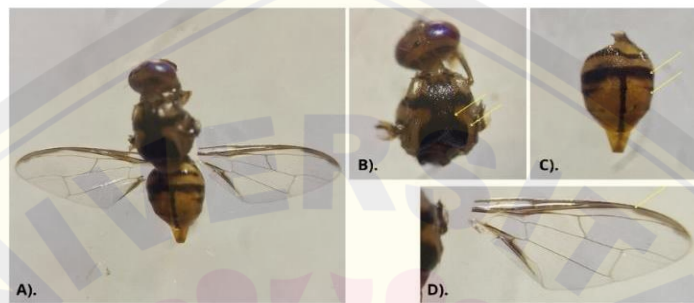
dalam augmentorium merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan pelepasan parasitoid dan retensi lalat buah, sehingga kapasitas muatan menjadi komponen krusial dalam desain operasional augmentorium. Jang et al., (2007) menyatakan bahwa augmentorium merupakan teknik sanitasi yang efektif untuk memutus siklus hidup lalat buah sekaligus mengoptimalkan kemunculan parasitoid dari buah yang telah terinfestasi. Penelitian ini memperluas validasi tersebut pada tiga komoditas hortikultura secara bersamaan dan menunjukkan bahwa efektivitas augmentorium tidak bersifat seragam, melainkan sangat kontekstual tergantung pada karakteristik fisik buah inang dan jumlah biomassa yang diinkubasi. Taktik PHT yang menggabungkan berbagai metode pengendalian secara sinergis dapat menekan populasi hama hingga di bawah ambang ekonomi dengan dampak minimal terhadap lingkungan (Deguine et al., 2011). Augmentorium memenuhi prinsip tersebut karena menggabungkan sanitasi fisik dengan augmentasi parasitoid dalam satu perangkat.

#### **4.5 Identifikasi Jenis Lalat Buah dan Parasitoid serta Komposisi pada setiap Komoditas**

##### **4.5.1. Jenis lalat buah**

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa terdapat dua spesies lalat buah yang ditemukan selama penelitian, yaitu *B. dorsalis* dan *B. carambolae*. Spesies *B. dorsalis* ditemukan pada buah jambu kristal dan cabai rawit. Identifikasi spesies ini didasarkan pada karakter morfologi imago, meliputi pola hitam berbentuk huruf “T” pada abdomen yang terbentuk dari pita longitudinal median dan pita transversal pada pangkal tergite III (Gambar 4.9c), scutum berwarna dominan hitam dengan pita lateral kuning, serta sayap transparan dengan pola costa yang khas (Gambar 4.9d) (Leblanc et al., 2015). Karakter diagnostik tersebut konsisten dengan deskripsi *B. dorsalis* yang merupakan salah satu hama lalat buah paling destruktif dan invasif di kawasan Asia tropis, dengan sebaran yang kini mencakup lebih dari 65 negara di enam benua (Jiang et al., 2022). Spesies *B. dorsalis* yang ditemukan pada jambu kristal dan cabai rawit menunjukkan bahwa lalat buah ini memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai jenis tanaman inang. Sifat *polifag* yang dimiliki memungkinkan *B. dorsalis* memanfaatkan berbagai jenis buah sebagai

tempat peletakan telur dan sumber makanan bagi larva. Spesies ini telah tercatat menyerang lebih dari 300 jenis tanaman inang budidaya maupun liar, menjadikannya salah satu hama tephritid dengan kisaran inang terluas di antara genus *Bactrocera* (Moquet et al., 2024). Sifat polifag tersebut menjadikan *B. dorsalis* sering mendominasi populasi lalat buah pada ekosistem pertanian di kawasan tropik Asia (Hassani et al., 2022).



**Gambar 4.9** a) Morfologi lalat buah *B. dorsalis*; b) *thoraks* ada pita lateral kuning; c) abdomen terga III-V dengan pola T; d) pita kosta sempit yang menekuk di ujung R2+3. (dokumentasi pribadi)

Spesies *B. carambolae* ditemukan menyerang buah jambu kristal dan belimbing. Identifikasi spesies ini didasarkan pada karakter morfologi yang serupa dengan *B. dorsalis*, namun dapat dibedakan berdasarkan pita costal yang lebih lebar pada sayap (Gambar 4.10d), serta pola warna abdomen dengan pita hitam lateral pada tergit abdominal yang lebih lebar dan lebih tegas (Gambar 4.10c) (Sudiarta et al., 2020). Selain itu, *B. carambolae* memiliki asosiasi ekologis yang erat dengan belimbing (*A. carambola*) sebagai salah satu tanaman inang utamanya, sehingga nama spesies ini secara langsung merujuk pada tanaman tersebut (Costa et al., 2025). Keberadaan *B. carambolae* pada jambu kristal juga mengonfirmasi bahwa tanaman ini merupakan inang alternatif yang sesuai bagi perkembangan larva dan reproduksi spesies ini. Ditemukannya dua spesies lalat buah pada jambu kristal mengindikasikan bahwa tanaman tersebut memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap infestasi lalat buah dibandingkan dua komoditas inang lainnya.

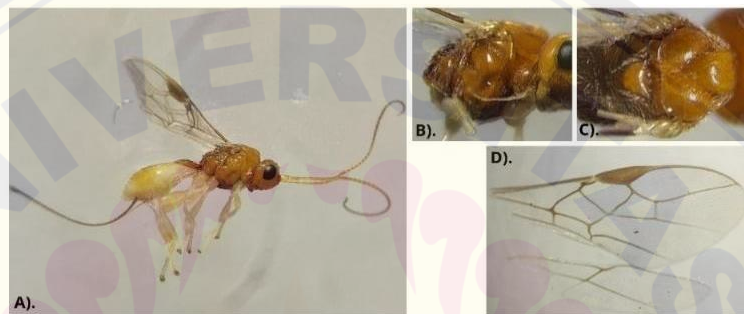


**Gambar 4. 10 a) Morfologi lalat buah *B. carambolae*; b) ) thoraks hitam, mungkin terdapat bercak kecil berwarna coklat; c) pita berbentuk persegi panjang pada sudut anterolateral terga IV; d) pita kosta tampak lebih tebal. (dokumentasi pribadi)**

#### 4.5.2. Jenis parasitoid

Selain lalat buah, penelitian ini juga berhasil mengidentifikasi tiga jenis parasitoid yang berasosiasi dengan inangnya. Parasitoid pertama yang ditemukan adalah *Fopius* sp., yang ditemukan pada buah jambu kristal dan belimbing. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa parasitoid memiliki karakter yang sesuai dengan genus *Fopius* sp., yaitu: (1) sayap memiliki banyak venasi dan sel sayap seperti karakter pada Famili Braconidae dan Ichneumonidae; (2) terdapat venasi RS+M, sedangkan venasi 2m-cu tidak ditemukan (Gambar 4.11d); (3) mandibula berbentuk normal, menyempit pada bagian ujung, dan saling bersentuhan ketika tertutup; (4) sternaulus tidak terlihat atau hanya berupa satu alur sederhana (Gambar 4.11b); dan (5) mesonotum memiliki notauli yang terlihat jelas dengan permukaan yang bertekstur (*sculptured*) hingga bagian tengah mesonotum (Gambar 4.11c) (Wharton dan Yoder, 2003). Karakter pembeda utama pada genus ini adalah keberadaan notauli pada mesonotum yang memiliki tekstur jelas hingga bagian tengah sehingga mengarah pada identifikasi *Fopius* sp. Karakter pembeda utama pada genus ini adalah keberadaan notauli pada mesonotum yang memiliki tekstur jelas hingga bagian tengah sehingga mengarah pada identifikasi *Fopius* sp. Identifikasi genus ini didasarkan pada karakter antena yang panjang dan *filiform*, venasi sayap yang khas dari subfamili Opiinae (famili Braconidae), serta ovipositor yang relatif panjang yang berfungsi untuk meletakkan telur pada telur inang di dalam buah.

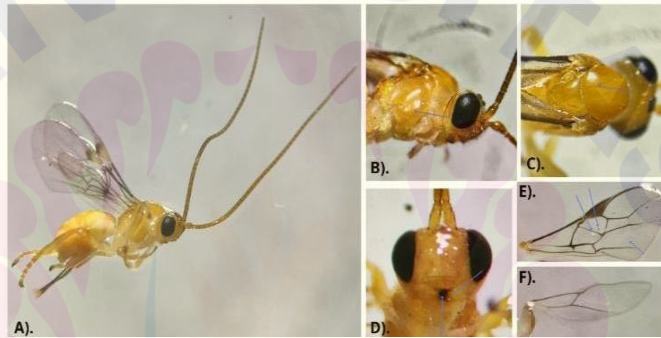
*Fopius* sp. termasuk dalam famili Braconidae dan berstatus sebagai parasitoid endoparasitoid koinobiont. Parasitoid ini meletakkan telur pada telur atau larva instar awal lalat buah, kemudian berkembang di dalam tubuh inang hingga inang memasuki fase pupa, sehingga imago parasitoid muncul dari pupa inang (Groth et al., 2016). Keberadaan *Fopius* sp. pada dua jenis tanaman inang yang berbeda (jambu kristal dan belimbing) mengindikasikan bahwa parasitoid ini memiliki kisaran inang yang relatif luas serta kemampuan adaptasi yang baik terhadap beberapa spesies lalat buah Tephritidae yang berbeda (Cai et al., 2020).



**Gambar 4.11 a) Morfologi parasitoid *Fopius* sp; b) sternaulus terdapat satu alur sederhana; c) mesonotum memiliki notauli yang jelas ; d) vena RS+M ada dan vena 2m-cu tidak ada. (dokumentasi pribadi)**

Parasitoid kedua yang ditemukan adalah *Psytalia* sp. yang hanya ditemukan pada cabai rawit. Identifikasi genus ini didasarkan pada karakter karakter sebagai berikut: (1) sayap memiliki banyak venasi dan sel sayap yang sesuai dengan karakter Famili Braconidae dan Ichneumonidae; (2) terdapat venasi RS+M, sedangkan venasi 2m-cu tidak ditemukan (Gambar 4.12e); (3) mandibula memiliki bentuk normal, menyempit pada bagian ujung, serta kedua bagian mandibula saling bersentuhan atau tumpang tindih ketika tertutup yang menjadi karakter kelompok Opiinae dan Braconinae (Gambar 4.12d); (4) sternaulus tidak terlihat atau hanya berupa satu alur sederhana yang dapat memiliki tekstur maupun tidak bertekstur (Gambar 4.12c); (5) mesonotum memiliki notauli yang terlihat jelas dan umumnya tidak memiliki lekukan (Gambar 4.12b); (6) sel submarginal kedua pada sayap depan berukuran besar; (7) venasi m-cu pada sayap depan mengarah

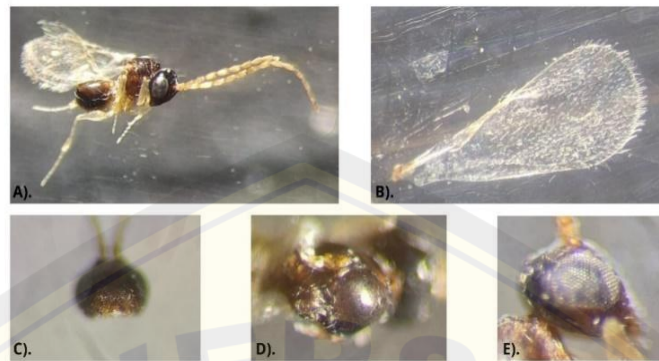
menuju sel submarginal pertama sehingga membentuk sel submarginal kedua berbentuk empat sisi; (8) sayap belakang memiliki subbasal cell yang relatif panjang; dan (9) clypeus berukuran pendek dengan bagian labrum terlihat jelas (Wharton dan Yoder, 2003). Diperkuat oleh studi yang menjelaskan dengan ciri karakter tubuh yang ramping, abdomen memanjang, antena *filiform* yang panjang, dan pola venasi sayap yang khas dari subfamili Opiinae, famili Braconidae (Yang et al., 2018). Genus *Psytalia* merupakan parasitoid larva-pupa (*larval-pupal parasitoid*) koinobiont yang menyerang larva instar pertama hingga ketiga berbagai spesies lalat buah dari famili Tephritidae. Larva parasitoid menyelesaikan perkembangannya di dalam tubuh inang dan imago dewasa muncul dari pupa inang.



**Gambar 4.12 a) Morfologi parasitoid *Psytalia* sp; b) sternaulus tidak ada; c) mesonotum bernotauli ; d) mandibula tumpang tindih; e) vena RS+M ada dan vena 2m-cu tidak ada; f) sayap belakang (dokumentasi pribadi)**

Parasitoid ketiga yang ditemukan adalah *Trichopria* sp., yang hanya ditemukan pada jambu kristal. Berdasarkan karakter morfologi, parasitoid ini termasuk dalam genus *Trichopria* sp. dengan ciri: (1) sayap memiliki venasi yang lebih sederhana atau mengalami reduksi dibandingkan kelompok Braconidae (Gambar 4.13e); (2) pola venasi sayap tidak memiliki postmarginal vein serta tidak terdapat venasi pada bagian distal sayap (Gambar 4.13e); (3) scutellum berbentuk normal tanpa dorsal plate (Gambar 4.13d), dengan venasi sayap yang lebih sederhana dan terkadang terdapat struktur kecil menyerupai stigma; (4) kepala jika dilihat dari sisi lateral tidak memiliki *post-occipital carina* yang jelas dan bersudut; (5) mandibula tidak berbentuk falcate (Gambar 4.13c); dan (6) antena betina umumnya memiliki 12 ruas, sedangkan antena jantan memiliki 14 ruas.

Berdasarkan karakter tersebut, parasitoid diidentifikasi sebagai *Trichopria sp.* dari Famili Diapriidae (Wharton & Yoder, 2003).

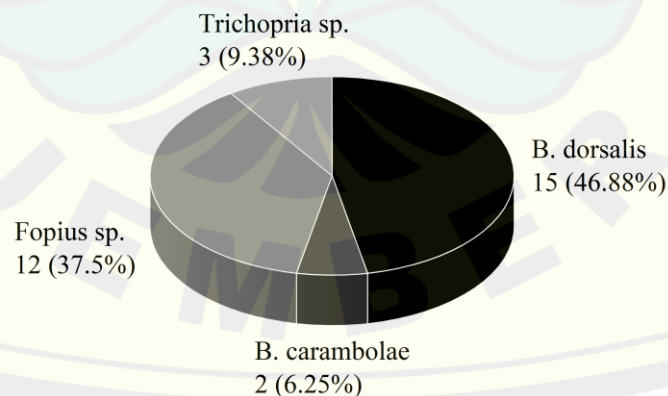


**Gambar 4.13 a) Morfologi parasitoid *Trichopria sp.*; b) sayap dengan venasi yang berkurang c) kepala *Trichopria sp.*, mandibula tidak falcate; d) scutellum normal; e) kepala dari sisi lateral (dokumentasi pribadi)**

*Trichopria sp.* merupakan *endoparasitoid* pupa yang berkembang sepenuhnya di dalam pupa lalat buah sebagai inang hingga imago dewasa muncul (Chen et al., 2018).

#### 4.4.3. Komposisi kemunculan imago lalat buah dan parasitoid

##### *P. guava*

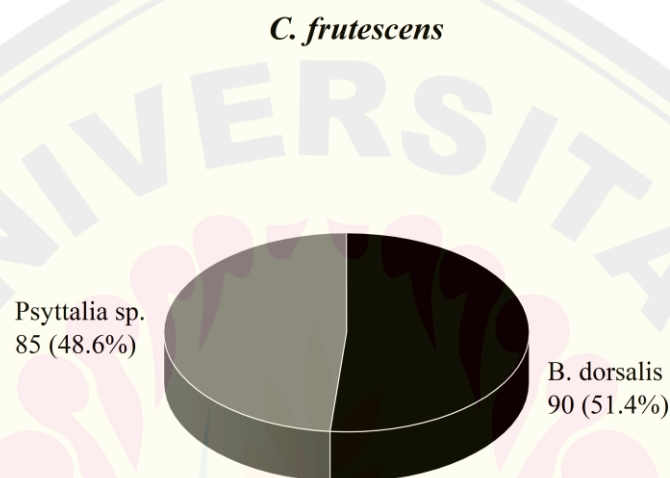


**Gambar 4. 14 Komposisi lalat buah dan parasitoid pada jambu kristal (angka dalam bentuk nilai asli dan persentase)**

Berdasarkan diagram komposisi pada tanaman jambu biji (*P. guava*), diperoleh total 32 individu yang terdiri atas 2 spesies lalat buah dan satu jenis parasitoid. Lalat buah *B. dorsalis* mendominasi komposisi keseluruhan dengan jumlah 15 individu (46,88%) (Gambar 4.13). Buah jambu biji dapat menjadi inang yang lebih dipilih oleh *B. dorsalis* untuk oviposisi ketika tersedia beberapa pilihan buah. Studi melaporkan bahwa pada percobaan pilihan inang, aktivitas peletakan telur hanya teramati pada buah jambu biji dari pada buah lain. (Nor et al., 2018). Spesies lalat buah kedua, *B. carambolae*, ditemukan dengan jumlah yang jauh lebih sedikit, yaitu 2 individu (6,25%). Meskipun preferensi utama *B. carambolae* adalah pada buah belimbing, sehingga kehadirannya dalam jumlah kecil pada jambu kristal mencerminkan statusnya sebagai inang sekunder bagi spesies tersebut.

Parasitoid *Fopius* sp. sebagai parasitoid dominan dengan jumlah 12 individu (37,5%), serta *Trichopria* sp. sebanyak 3 individu (9,38%) (Gambar 4.13). Keberadaan *Fopius* sp. pada jambu kristal ini konsisten dengan studi bahwa tingkat parasitasi *F. arisanus* pada jambu di lapangan mencapai 45,8%, dan parasitoid ini aktif berkembang biak pada buah jambu biji yang terinfestasi *B. dorsalis* (Cai et al., 2020). Tingginya proporsi *Fopius* sp. berkorelasi erat dengan dominasi *B. dorsalis* pada pertanaman ini, mengingat *Fopius arisanus* merupakan parasitoid endoparasitoid koinobiont telur-pupa yang diakui sebagai salah satu agens pengendali hayati paling efektif untuk hama lalat buah Tephritidae, dengan kemampuan memarasit telur dan instar pertama dari sekitar 40 spesies hama Tephritidae (Cai et al., 2020). Interaksi tritrofik antara *Fopius* sp., spesies lalat buah, dan tanaman inang membentuk jaringan interaksi tidak langsung yang memengaruhi dinamika komunitas lalat buah secara keseluruhan (Moquet et al., 2023). Adapun *Trichopria* sp. yang ditemukan dalam jumlah lebih rendah merupakan parasitoid pupa, genus *Trichopria* (Hymenoptera: Diapriidae) dikenal sebagai parasitoid endoparasitoid pupa yang penting pada berbagai spesies lalat buah dan berpotensi sebagai agens pengendalian hayati sehingga kehadirannya pada jambu kristal menunjukkan bahwa siklus hidup lalat buah pada tanaman inang ini berlangsung penuh hingga fase pupa di dalam tanah di sekitar pertanaman (Chen et al., 2018). (Lisi et al., 2025) melaporkan bahwa larva instar pertama *Trichopria*

*sp.*, menetas 1–2 hari setelah parasitasi dan berkembang melalui tiga stadium larval sebagai endoparasitoid di dalam puparium inang sebelum membentuk pupa, mengindikasikan strategi perkembangan koinobion yang berlangsung sepenuhnya di dalam puparium. . Kemungkinan besar, kehadiran *Trichopria sp.* mencerminkan populasi yang memang rendah di lapangan, atau secara alternatif, kondisi augmentorium kurang optimal bagi kemunculan parasitoid pupal ini dibandingkan kedua genus lainnya.



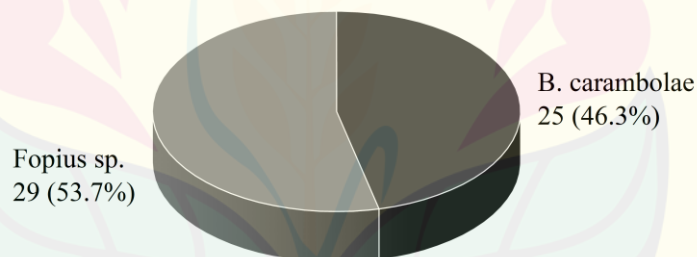
**Gambar 4.15** Komposisi lalat buah dan parasitoid pada cabai rawit (angka dalam bentuk nilai asli dan persentase)

Pada tanaman cabai rawit (*C. frutescens*), diperoleh total 175 individu yang hanya terdiri atas satu spesies lalat buah dan satu jenis parasitoid. Lalat buah *B. dorsalis* mendominasi dengan jumlah 90 individu (51,4%) (Gambar 4.15). Kehadiran *B. dorsalis* pada *C. frutescens* sejalan dengan sifatnya sebagai hama *polifagus* yang menyerang berbagai komoditas hortikultura *B. dorsalis* dikenal sebagai hama utama pada pertanaman cabai di Indonesia yang menyebabkan buah membusuk dan mengakibatkan kerugian hasil antara 40 hingga 60%, bahkan dapat mencapai 100% apabila tidak dilakukan pengendalian (Syamsudin et al., 2019). Tidak ditemukannya spesies lalat buah lain selain *B. dorsalis* pada tanaman ini mengindikasikan bahwa *C. frutescens* merupakan inang yang secara selektif lebih cocok bagi *B. dorsalis* dibandingkan spesies *Bactrocera* lainnya, sesuai dengan

temuan bahwa tingkat resistensi cabai terhadap infestasi lalat buah sangat bervariasi bergantung pada karakteristik morfokimia buah (Syamsudin et al., 2022).

Parasitoid yang berhasil didapat hanya satu jenis, yaitu *Psyttalia* sp. dengan jumlah 85 individu (48,6%) (Gambar 4.15), suatu proporsi yang sangat tinggi dan mengindikasikan tingkat parasitisme alami yang signifikan pada pertanaman cabai rawit. *Psyttalia incisi* (Silvestri) diketahui sebagai parasitoid larva–pupa soliter yang menjadi parasitoid dominan terhadap *B. dorsalis* di berbagai sentra produksi buah (Lin et al., 2021). *Psyttalia* sp. Tingginya proporsi *Psyttalia* sp. pada *C. frutescens* kemungkinan berkaitan dengan ketersediaan inang larva *B. dorsalis* yang melimpah di dalam buah cabai, yang memberikan kondisi optimal bagi parasitoid larva untuk menyelesaikan siklus hidupnya.

#### *A. carambola*



**Gambar 4.16** Komposisi lalat buah dan parasitoid pada belimbing (angka dalam bentuk nilai asli dan persentase)

Pada buah belimbing (*A. carambola*) yang telah di inkubasi menunjukkan keberadaan lalat buah *B. carambolae* sebanyak 25 individu (46,3%) (Gambar 4.16). Spesies ini merupakan hama utama pada tanaman belimbing di kawasan Asia Tenggara dan diketahui memiliki preferensi inang yang kuat terhadap famili Oxalidaceae (Schutze et al., 2015). Lalat buah ini meletakkan telur di bawah permukaan kulit buah, dan larva yang menetas akan merusak daging buah hingga menyebabkan gugur sebelum matang (Doorenweerd et al., 2018). Tingkat infestasi

yang ditemukan mengindikasikan bahwa *B. carambolae* aktif menyerang buah belimbing di lokasi pengambilan sampel.

Parasitoid *Fopius* sp. (Hymenoptera: Braconidae) mendominasi hasil inkubasi dengan 29 individu (53,7%) (Gambar 4.16), menghasilkan rasio parasitoid terhadap inang sebesar 1,16:1. *Fopius* sp. merupakan endoparasitoid soliter yang memarasit larva lalat buah famili Tephritidae dan dikenal sebagai agen biokontrol potensial, dengan tingkat parasitisasi alami yang dapat mencapai lebih dari 50% pada kondisi lapangan yang mendukung (Groth et al., 2016). Keberadaan parasitoid indigenus ini membuka peluang program augmentasi biokontrol tanpa introduksi spesies asing, mengingat parasitoid lokal umumnya lebih adaptif terhadap kondisi iklim dan inang setempat (Garcia et al., 2020).

#### 4.6 Parasitasi Parasitoid pada setiap Kombinasi Perlakuan

**Tabel 4. 4 Tabel parasitasi pada berbagai perlakuan**

|      | Jenis lalat buah   |                      | Jenis parasitoid     |                   |                       | Parasitasi (%)       |                   |                       | Total parasitasi (%) |
|------|--------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|
|      | <i>B. dorsalis</i> | <i>B. carambolae</i> | <i>Psyttalia</i> sp. | <i>Fopius</i> sp. | <i>Trichopria</i> sp. | <i>Psyttalia</i> sp. | <i>Fopius</i> sp. | <i>Trichopria</i> sp. |                      |
| P1B1 | 5                  | -                    | -                    | 5                 | 2                     | -                    | 11.11             | 4.44                  | 15.55                |
| P1B2 | 6                  | 2                    | -                    | 3                 | 1                     | -                    | 4.23              | 1.41                  | 5.64                 |
| P1B3 | 4                  | -                    | -                    | 4                 | -                     | -                    | 4.04              | -                     | 4.04                 |
| P2B1 | 23                 | -                    | 26                   | -                 | -                     | 34.21                | -                 | -                     | 34.21                |
| P2B2 | 37                 | -                    | 41                   | -                 | -                     | 39.81                | -                 | -                     | 39.81                |
| P2B3 | 30                 | -                    | 18                   | -                 | -                     | 18.95                | -                 | -                     | 18.96                |

|      |   |    |   |    |   |   |       |   |       |
|------|---|----|---|----|---|---|-------|---|-------|
| P3B1 | - | 12 | - | 10 | - | - | 14.49 | - | 14.49 |
| P3B1 | - | 11 | - | 13 | - | - | 17.81 | - | 17.81 |
| P3B3 | - | 2  | - | 6  | - | - | 7.50  | - | 7.50  |

Hasil inkubasi buah dari tiga jenis tanaman inang menunjukkan variasi tingkat parasitasi yang substansial: tertinggi pada cabai rawit (P2) dengan kisaran 18,96–39,81%, diikuti belimbing (P3) sebesar 7,50–17,81%, dan terendah pada jambu kristal (P1) sebesar 4,04–15,55% (Tabel 4.4). Tiga genus parasitoid berhasil diisolasi, yaitu *Psytalia* sp., *Fopius* sp., dan *Trichopria* sp., dengan komposisi berbeda-beda tergantung jenis buah inang. Laporan di Jawa Timur, *Fopius* spp. mendominasi asosiasi dengan *Bactrocera* sp., dengan tingkat parasitasi lebih tinggi pada pertanaman tanpa insektisida sintetik, mengindikasikan bahwa kondisi pertanaman yang tidak terganggu bahan kimia mendukung aktivitas parasitoid alami (Tarno et al., 2025). Keberhasilan parasitasi sangat bervariasi tergantung spesies lalat buah inangnya parasitoid yang bekerja baik pada satu inang dapat mencapai parasitasi sangat rendah atau bahkan nol pada inang lain (Gwokyalya et al., 2022).

Perbedaan parasitasi parasitoid antar jenis buah mencerminkan spesifisitas asosiasi inang dan parasitoid dalam sistem tritrofik yang terbentuk. Pada cabai rawit yang hanya diinfeksi *B. dorsalis*, secara eksklusif hanya *Psytalia* sp. yang hadir, pada belimbing yang diinfeksi *B. carambolae*, hanya *Fopius* sp. yang ditemukan, sedangkan pada jambu kristal yang diinfeksi keduanya, terdapat *Fopius* sp. dan *Trichopria* sp. Melalui studi multiplex PCR didapatkan hasil bahwa *Fopius* sp secara konsisten berasosiasi dengan *B. carambolae* pada buah belimbing dan jambu (Shariff et al., 2014), didukung pula oleh laporan dari Malaysia yang menemukan asosiasi tritrofik baru antara *F. arisanus*, *B. carambolae*, dan *Syzygium samarangense* yang dikonfirmasi secara molekuler (Yaakop & Aman, 2013).

Terdapat studi yang menunjukkan bahwa *F. arisanus* terbukti mampu membedakan telur dari spesies lalat buah yang berbeda, dan preferensi parasitoid terhadap tanaman inang berubah sesuai spesies lalat buah yang menginfestasi, mencerminkan kompleksitas dinamis dalam jaringan interaksi tritrofik (Moquet et al., 2023).

Keberadaan *Trichopria* sp. yang terbatas hanya pada jambu kristal berbobot ringan dan sedang memerlukan penjelasan mekanistik tersendiri. Sebagai anggota Diapriidae yang umumnya dikenal sebagai parasitoid pupal, kemunculannya dari buah yang masih mengandung larva mengindikasikan strategi koinobion, yakni oviposisi pada larva instar akhir namun perkembangan baru selesai setelah inang mencapai stadium pupa. *Trichopria* sp (Hymenoptera: Diapriidae) merupakan endoparasitoid penting pada beberapa spesies lalat buah termasuk *D. suzukii*, dan kajian mengenai parasitoid ini menunjukkan potensi besar sebagai agen pengendalian hayati hama lalat buah (Chen et al., 2018). Keterbatasannya hanya pada jambu kristal konsisten dengan preferensi akses fisik, mengingat panjang ovipositor merupakan karakteristik penentu aksesibilitas inang pada kedalaman substrat yang berbeda, sehingga strategi koinobion larval-pupal umum dijumpai pada parasitoid Diptera dari berbagai famili Hymenoptera.

Beberapa studi lapangan telah mengidentifikasi korelasi terbalik antara tingkat parasitasi dan radius buah. Buah berukuran lebih besar menyulitkan parasitoid larval untuk menjangkau inangnya, dan parasitoid dengan ovipositor lebih panjang dapat mengeksploitasi kisaran buah yang lebih luas. Hal ini dibuktikan secara eksperimental oleh Baser et al., (2019) yang menunjukkan bahwa oviposisi *Psytalia* sp. terhambat nyata ketika jarak antara permukaan buah dan posisi larva melebihi 2,5 mm, dan bahwa larva inang paling mudah diparasit pada jarak 0–1,5 mm dari permukaan. Parasitoid *Fopius* sp. yang mengoviposisi dekat permukaan kulit buah tidak sepenuhnya terkendala ketebalan mesokarp, sehingga masih terdeteksi meski dengan tingkat parasitasi lebih rendah pada buah berat. Panjang ovipositor parasitoid menentukan kisaran ukuran buah yang dapat diakses, sehingga pemilihan spesies parasitoid yang sesuai dengan jenis dan ukuran buah

inang *Psytalia* sp. untuk cabai rawit dan *Fopius* sp. untuk jambu kristal serta belimbing menjadi kunci keberhasilan program pengendalian hayati (Sivinski & Aluja, 2012). Hal ini mengindikasikan bahwa parasitoid indigenus di wilayah Jawa Timur, termasuk Jember, memiliki potensi pengendalian alami yang cukup tinggi apabila kondisi pertanian mendukung aktivitasnya, terutama apabila penggunaan insektisida sintetis dapat dikurangi (Tarno et al., 2025).

