

**Research Article****Efek Eugenol dan Kombinasinya dengan Asam Lemak terhadap Toksisitas dan Aktivitas Enzim pada *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)*****The Effect of Eugenol and Its Mixtures with Several Fatty Acids on the Toxicity and Enzyme Activity of Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae)*****Lili Amelia^{1*}, Yusup Hidayat², Danar Dono²**¹Program Studi Magister Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran²Departemen Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang KM 21 Jatinangor 45363

Received: May 13, 2026 /Received in revised : June 14, 2026/ Accepted: June 15, 2026

ABSTRACT

Spodoptera frugiperda has become a serious threat to maize production in Indonesia, causing significant yield losses. This study aimed to evaluate the effectiveness of combinations of eugenol and fatty acids (oleic acid, myristic acid, and lauric acid) against the mortality of *S. frugiperda* larvae. All mixtures of eugenol and fatty acids were prepared at a ratio of 1:5 and tested at five concentration levels (0.1, 0.5, 1, 2, and 5% w/v) along with a control treatment. The results showed significant differences in activity among treatments. Almost all tested concentrations of the eugenol and oleic acid mixture (0.5, 1, 2, and 5%) significantly affected larval mortality, with mortality values ranging from 80–100%. The combination of eugenol and lauric acid increased larval mortality starting at 0.5% concentration, reaching 28.74%. Meanwhile, the highest mortality in the eugenol and myristic acid treatment occurred at 2% and 5% concentrations, with mortality rates of 98.75% and 100%, respectively. Toxicity analysis showed that the LD₅₀ value of eugenol alone was 0.69 mg g⁻¹ larva, while the combinations with oleic acid, lauric acid, and myristic acid resulted in LD₅₀ values of 0.25, 0.74, and 0.50 mg g⁻¹ larva, respectively. The synergistic ratio (SR) indicated that the combination of eugenol and oleic acid produced the highest synergistic effect, with an SR value of 2.76. All combinations of eugenol and fatty acids affected the specific activities of cytochrome P450, glutathione S-transferase, and esterase enzymes in *S. frugiperda* larvae. Overall, the combination of eugenol and oleic acid (1:5) showed the best effect compared to combinations of eugenol with lauric acid or myristic acid against *S. frugiperda* larvae.

Keywords: Eugenol; Fatty Acid; Fall Armyworm; Topical; Botanical Pesticide**ABSTRAK**

Indonesia dan menyebabkan kerugian hasil yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keefektifan kombinasi eugenol dan asam lemak (asam oleat, asam miristat dan asam laurat) terhadap mortalitas larva *S. frugiperda*. Semua campuran eugenol dan asam lemak disiapkan dalam rasio 1:5 dengan lima tingkat konsentrasi (0,1; 0,5; 1; 2 dan 5 % (w/v)) serta kontrol. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan aktivitas yang nyata antara perlakuan. Hampir semua konsentrasi yang diuji pada campuran eugenol dan asam oleat (0,5, 1, 2 dan 5%) berpengaruh nyata terhadap mortalitas larva *S. frugiperda* dengan nilai mortalitas sebesar 80-100%. Campuran eugenol dan asam laurat menunjukkan peningkatan mortalitas

*Korespondensi Penulis

E-mail : yusup.hidayat@unpad.ac.idDOI: <https://doi.org/10.33019/agrosainstek.v10i1.1003>

mulai dari konsentrasi 0,5% yaitu sebesar 28,74%. Sedangkan pada campuran eugenol dan asam miristat, mortalitas paling tinggi terjadi pada konsentrasi 2% dan 5% masing-masing 98,75% dan 100%. Analisis toksisitas menunjukkan nilai LD₅₀ eugenol tunggal sebesar 0,69 mg gr⁻¹ larva, sedangkan kombinasi dengan asam oleat, asam laurat, dan asam miristat masing-masing sebesar 0,25; 0,74; dan 0,50 mg gr⁻¹ larva. Nilai synergistic ratio (SR) menunjukkan bahwa kombinasi eugenol dan asam oleat memberikan efek sinergis tertinggi yaitu 2,76. Seluruh perlakuan kombinasi eugenol dan asam lemak memengaruhi aktivitas spesifik enzim sitokrom P450, glutathion S-transferase, dan esterase pada larva *S. frugiperda*. Secara keseluruhan, campuran eugenol dan asam oleat (1:5) memberikan efek terbaik dibandingkan campuran eugenol dengan asam laurat atau dengan asam miristat (1:5) terhadap larva *S. frugiperda*.

Kata kunci: Asam lemak; Eugenol; Ulat grayak jagung; Topikal; Pestisida Nabati

1. Pendahuluan

Spodoptera frugiperda atau yang biasa dikenal dengan ulat grayak jagung merupakan salah satu hama pertanian penting secara global. Serangga ini memiliki kemampuan menyerang lebih dari 350 spesies tanaman, terutama pada famili Poaceae, Asteraceae dan Fabaceae (Montezano *et al.*, 2018). Berdasarkan laporan, kerugian akibat *S. frugiperda* bervariasi antara 22 hingga 67% di berbagai belahan dunia (Day *et al.*, 2017; Kassie *et al.*, 2020). Sejak tahun 2019 sampai 2022, serangan *S. frugiperda* di berbagai wilayah Indonesia telah tercatat antara 15 hingga 100% (Asfiya *et al.*, 2020; Kalqutny *et al.*, 2021; Mukkun *et al.*, 2021; Subagyo *et al.*, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pengendalian *S. frugiperda* yang efektif. Seperti pemanfaatan tanaman sebagai pestisida bahan alami yang ramah lingkungan.

Salah satu tanaman yang dapat digunakan sebagai pestisida nabati untuk mengendalikan serangan hama dari ordo lepidoptera yaitu *Syzigium aromaticum* atau biasa dikenal dengan tanaman cengkeh. Eugenol yang merupakan kandungan utama dari minyak cengkeh, diketahui memiliki kemampuan dalam mengendalikan serangan hama. Senyawa ini dilaporkan efektif terhadap beberapa serangan hama seperti ulat grayak jagung *S. frugiperda* (Vargas-Méndez *et al.*, 2019), ulat krop kubis *Crociodolomia pavonana* (Rismayani & Laba, 2016), ulat daun kubis *Plutella xylostella* (Da Camara *et al.*, 2022), *S. littoralis* (Wahba *et al.*, 2022), dan *S. litura* (Fateha *et al.*, 2020). Secara fisiologis, eugenol dan turunannya memiliki mekanisme kerja sebagai penghambat enzim Acetylcholinesterase (AChE) yang merupakan enzim penting dalam sistem saraf serangga. Penghambatan enzim ini menyebabkan akumulasi acetylcholine pada sinaps, sehingga menimbulkan gangguan impuls saraf yang berujung pada paralisis dan kematian serangga. Beberapa pengujian telah mengkonfirmasi kemampuan eugenol dalam mengikat acetylcholinesterase seperti pada *S. frugiperda* (Coelho *et al.*, 2022; Fernandes *et al.*, 2022; Vargas-Méndez *et al.*, 2019); *Tribolium*

castaneum (Ikawati *et al.*, 2022); dan *Aedes aegypti* (Almadiy, 2020).

Meskipun pestisida nabati memiliki berbagai kelebihan, nilai toksisitasnya yang rendah menjadi salah satu hambatan dalam pengembangan pestisida nabati. Nilai toksisitas insektisida dapat ditingkatkan dengan cara menambah bahan sinergis yang memiliki aktivitas penghambatan enzim detoksifikasi pada serangga (Tak & Isman, 2015). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi bahan toksik dan bahan sinergis dapat meningkatkan toksisitas bahan aktif hingga 20 kali lipat (Ramadan *et al.*, 2022).

Bahan sinergis dapat berasal dari bahan sintetik maupun alami. Beberapa bahan sinergis sintetik yang telah umum digunakan diantaranya *Piperonyl butoxide* (PBO) dan *S.S.S-tributyl phosphotritioate* (DEF) yang mampu menurunkan efek resistensi serangga hama pada insektisida sintetik (Chang *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2025). Selain digunakan pada bahan aktif sintetik, bahan sinergis sintetik dilaporkan mampu meningkatkan toksisitas dari bahan alami seperti minyak nabati *Origanum vulgare* (Chen *et al.*, 2023). Meskipun penggunaan bahan sinergis sintetik sudah banyak digunakan dalam penelitian toksisitas insektisida, bahan sinergis alami juga memiliki potensi yang sama kuatnya. Bahan alami yang memiliki kemampuan sebagai bahan sinergis diantaranya *Sesamum indicum* (Widayani *et al.*, 2023), *Piper amalago* (Francis *et al.*, 2025), dan asam lemak (Ramadan *et al.*, 2022).

Beberapa asam lemak diketahui dapat meningkatkan toksisitas insektisida dalam mengendalikan serangan hama. Asam linoleate dan asam oleat secara signifikan meningkatkan aktivitas permethrin terhadap *Myzus persicae* ketika dicampurkan dalam rasio 4:1 (Khot, 2009). Selain itu, asam linoleate juga memiliki efek sinergis pada toksisitas emamektin benzoate dan indoksakarb dalam mengendalikan hama *Spodoptera littoralis* (Eldesouky *et al.*, 2019).

Pemilihan asam oleat, asam laurat, dan asam miristat dalam penelitian ini didasarkan pada perbedaan struktur kimianya yang mencerminkan variasi panjang rantai karbon dan tingkat

kejenuhan. Asam oleat (C18:1) merupakan asam lemak tak jenuh tunggal dengan rantai panjang yang diketahui memiliki kemampuan meningkatkan penetrasi senyawa aktif melalui kutikula serangga akibat fleksibilitas molekulnya (de Melo *et al.*, 2018; Desbois & Smith, 2010). Asam laurat (C12:0) dan asam miristat (C14:0) merupakan asam lemak jenuh rantai sedang yang dilaporkan memiliki aktivitas biologis terhadap serangga dan mikroorganisme (Kim & Rhee, 2016; Ramadan *et al.*, 2022). Perbedaan sifat fisikokimia ketiga asam lemak tersebut diduga akan menghasilkan perbedaan kapasitas sinergisme dengan eugenol, sehingga perlu dikaji secara komparatif untuk mengidentifikasi kombinasi yang paling efektif.

Penambahan asam lemak rantai pendek (campuran asam kaprilat, asam nonanoat, dan asam kaprat) sebagai bahan sinergis pada insentisida sintetik deltamethrin, terbukti mampu meningkatkan toksisitasnya (Ramadan *et al.*, 2022). Sejauh ini belum ada penelitian mengenai penambahan asam lemak rantai panjang (asam oleat, asam miristat dan asam laurat) pada bahan alami seperti eugenol untuk mengendalikan hama *S. frugiperda*. Selain itu, belum ada yang mengukur dampak dari penambahan asam lemak rantai panjang terhadap reaksi enzimatik yang terjadi dalam tubuh *S. frugiperda*.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Pestisida dan Toksikologi Lingkungan, Departemen Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran. Waktu persiapan alat, bahan, pengujian, dan pengolahan data dimulai dari bulan Desember 2025 sampai April 2026.

Persiapan Serangga Uji *S. frugiperda*

Larva dikembangbiakkan di dalam wadah plastik kecil berukuran 34 x 28 x 7 cm yang diberi pakan jagung setiap harinya pada suhu 28±1 °C, dengan kelembapan relative 72±15%. Setelah larva berubah menjadi pupa, dipindahkan ke dalam kandang khusus tempat pemeliharaan imago yang berukuran 45 x 45 x 45 cm hingga menjadi imago.

Imago diberi pakan berupa cairan madu murni 10% menggunakan media kapas. Pada bagian sudut kandang diberi tisu yang menjadi tempat peletakkan telur oleh imago. Kelompok telur dikumpulkan setiap harinya dan di tempatkan pada wadah plastik berukuran 10 x 9 x 4,5 cm yang telah diberi alas kertas. Pemeliharaan serangga dilakukan secara berkala sehingga ketersediaan larva tetap terjaga selama proses pengujian.

Penyediaan Eugenol dan Asam Lemak

Bahan aktif eugenol 99,5% yang berasal dari tanaman cengkeh didapatkan dari van aroma (*Indonesia Essential Oils, Aroma Molecules and Botanical Extracts*). Asam lemak (Asam oleat, Asam miristat dan Asam laurat) didapatkan dari Multi Jaya Kimia.

Pengujian Efek Eugenol dan Kombinasinya dengan Asam Lemak terhadap Larva *S. frugiperda*

Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan Rancangan Acak Lengkap (RAL). Penelitian terdiri dari empat pengujian untuk melihat efek tunggal eugenol serta kombinasinya dengan tiga jenis asam lemak yaitu asam oleat, asam laurat dan asam miristat.

Eugenol dan masing-masing asam lemak dicampur menggunakan rasio 1:5 dalam pelarut aseton. Konsentrasi perlakuan yang digunakan (0,1; 0,5; 1; 2; dan 5%) (w/v) dinyatakan berdasarkan persentase eugenol, bukan berdasarkan konsentrasi total campuran. Eugenol berperan sebagai senyawa aktif utama, sementara asam lemak digunakan sebagai bahan sinergis. Perlakuan kontrol pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan aseton. Sebanyak 20 ekor larva instar 3 *S. frugiperda* digunakan pada setiap perlakuan dan diulang sebanyak empat kali.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan uji kontak dengan metode topikal yang dikembangkan dari penelitian Kiran *et al.*, (2008) dan Vargas-Méndez *et al.*, (2019). Larutan uji diaplikasikan pada bagian dorsal toraks larva menggunakan topikal dispenser sebanyak 1 µl untuk setiap perlakuan. Setelah diberi perlakuan, masing-masing larva ditempatkan dalam cawan petri (diameter = 9 cm; tinggi = 1,5 cm) yang telah dilapisi alas dari tisu dan diberi pakan berupa jagung semi. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah kematian serangga uji selama 24 jam. Larva *S. frugiperda* dikategorikan mati apabila disentuh dengan menggunakan kuas tidak memberikan respon pergerakan organ tubuhnya.

Data mortalitas yang diperoleh selanjutnya dianalisis menggunakan analisis probit guna menentukan nilai LD₅₀. Nilai LD₅₀ digunakan untuk menghitung efek sinergisme atau Sinergistic ratio (SR) dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Ramadan *et al.*, 2022):

$$SR = \frac{LC50 \text{ bahan aktif (eugenol)}}{LC50 \text{ campuran (eugenol+asam lemak)}}$$

Pengujian Aktivitas Enzim Detoksifikasi pada Larva *S. frugiperda*

Pengujian aktivitas tiga enzim detoksifikasi (Cytochrome P450, Esterase, dan GST) pada larva instar III *S. frugiperda* dilakukan menggunakan metode topikal dengan konsentrasi campuran 2% (1:5), di mana setiap taraf perlakuan dan kontrol diulang empat kali menggunakan 10 ekor larva per ulangan. Setelah diamati selama 48 jam, larva yang hidup dibekukan dan digerus dalam akuades (10 mg larva/mL) pada suhu 4°C, lalu disentrifugasi pada 10.000 rpm selama 30 menit untuk mendapatkan supernatan sebagai ekstrak enzim. Untuk mengukur kadar protein sampel, metode Lowry diterapkan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang ($\lambda = 750$ nm) dengan akuades sebagai blanko (Dono *et al.*, 2010), Hasilnya diplotkan terhadap kurva baku dari larutan standar Bovine Serum Albumin (BSA) berkonsentrasi 0,1 hingga 2,5 mg/mL yang direaksikan Pereaksi A (Larutan NaCO₃ 2% dalam NaOH 0,1 N), Pereaksi B (CuSO₄.5H₂O 0,5% dalam Na.K tartat 1%), Pereaksi C (Campuran pereaksi A dan B dengan perbandingan 50:1), dan Pereaksi D (Follin Ciocalteu dalam akuades dengan perbandingan 1:1).

Pengujian Aktivitas Enzim Sitokrom P450

Aktivitas enzim sitokrom P450 dalam penelitian ini dianalisis berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Ghaderi *et al.*, (2021). Homogenat serangga sebanyak 20 μ l ditambahkan kedalam microtiter plate. Kemudian ditambah dengan 80 μ l buffer fosfat potassium 0,625 M, 200 μ l larutan 3,3',5,5'-Tetramethylbenzidine (TMBZ) dan 25 μ l hydrogen peroksida 3% kedalam microtiter plate yang sama. Plate diinkubasi selama 2 jam pada suhu ruang dan absorbansi diukur pada panjang gelombang 450nm menggunakan spectrophotometer.

Pengujian Aktivitas Enzim Esterase

Aktivitas enzim esterase total ditentukan berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Ramadan *et al.* (2022). Prosedur yang dilakukan yaitu mempersiapkan sampel uji dengan mencampurkan 50 μ l asam lemak (sesuai perlakuan) dengan 950 μ l supernatan. Campuran diinkubasi pada suhu 37°C selama 15 menit. Setelah itu, menyiapkan tabung reaksi yang berisi 0,5 ml buffer fosfat 0,1 M pH 7,5 dicampurkan 15 μ l substrat α -naftil asetat (0,02 M dalam methanol murni), 2 ml fast blue RR (0,2 mg/ml H₂O) dan 50 μ l

sampel uji *S. frugiperda* yang telah diinkubasi sebelumnya. Kemudian smpuran diinkubasi kembali pada suhu 37°C selama 30 menit. Aktivitas enzimatik dilakukan menggunakan spectrophotometer pada $\lambda = 490$ nm. Aktivitas esterase total dinyatakan sebagai serapan cahaya per menit per mg protein.

Pengujian Aktivitas Enzim Glutation S-transferase

Pengujian aktivitas enzim glutation S-transferase (GST) pada larva *Spodoptera frugiperda* dapat dilakukan menggunakan metode kombinasi dari Dono *et al.*, (2010) dan Ramadan *et al.*, (2022). Untuk pengukuran aktivitas GST, larutan reaksi terdiri dari 730 μ l buffer glutation tereduksi (10 mM), 10 μ l substrat CDNB (150 mM), dan 10 μ l enzim (homogenat/supernatan), lalu dicampur dalam kuvet 1,5 mL. Absorbansi diukur pada panjang gelombang 340 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Aktivitas enzim dinyatakan sebagai Δ Abs/min/mg protein.

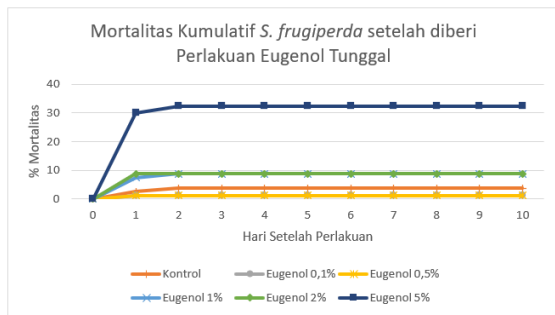
Analisis Data

Data yang diperoleh terlebih dahulu diuji menggunakan uji normalitas dan homogenitas. Apabila data tidak terdistribusi normal, maka dilakukan transformasi data sebelum dianalisis menggunakan analisis varians (ANOVA). Data kemudian dianalisis dengan uji ANOVA pada taraf kepercayaan 95%. Apabila terhadap pengaruh nyata dari perlakuan, maka dilakukan uji lanjut Tukey untuk mengidentifikasi perbedaan antarperlakuan. Perangkat lunak yang digunakan untuk analisis yaitu Minitab versi 22.

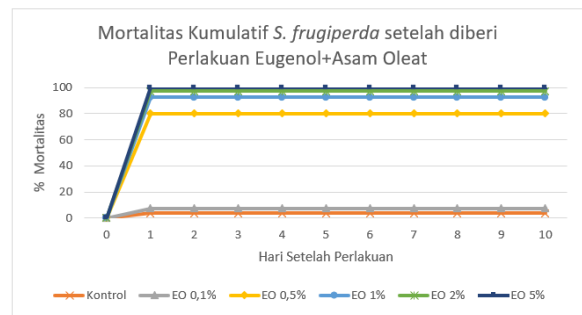
3. Hasil

Pengaruh Eugenol dan Campurannya dengan Asam Lemak terhadap Mortalitas *S. frugiperda*

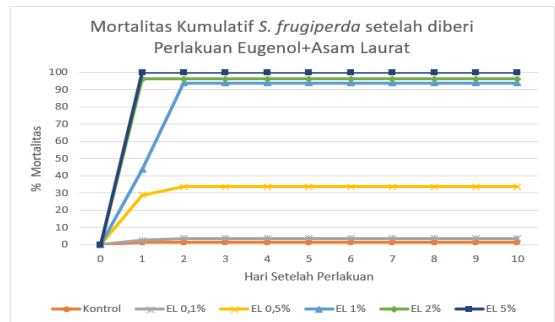
Tiga kombinasi eugenol dan asam lemak telah diuji dengan menggunakan metode topikal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran eugenol dan asam oleat (1:5) memberikan efek mortalitas lebih tinggi dibandingkan campuran eugenol dengan asam laurat atau dengan asam miristat (1:5). Efektivitas campuran juga lebih baik jika dibandingkan dengan perlakuan eugenol saja. Ini adalah laporan pertama mengenai keefektifan campuran eugenol dan asam lemak terhadap suatu spesies serangga hama.



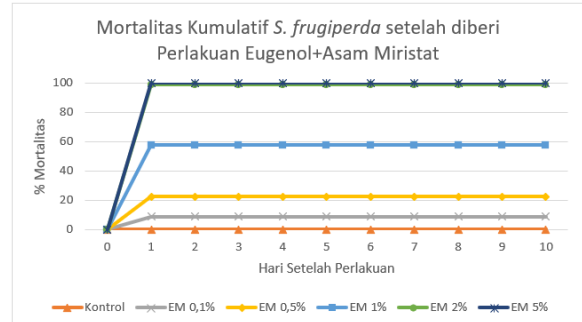
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 1. Mortalitas Akumulatif *S. frugiperda* setelah Perlakuan Eugenol dan Campurannya dengan Asam Lemak

Pengaruh Eugenol Tunggal Terhadap Mortalitas Larva *S. frugiperda*

Hasil percobaan menunjukkan bahwa perlakuan eugenol berpengaruh nyata terhadap mortalitas larva *S. frugiperda*. Diantara semua konsentrasi yang diuji, yang memberikan pengaruh nyata terhadap mortalitas adalah perlakuan eugenol pada konsentrasi 5%. Pada konsentrasi

tersebut mortalitas larva *S. frugiperda* sebesar 30%. Pada konsentrasi 0,1 – 2%, mortalitas larva *S. frugiperda* berkisar antara 1,25 – 8,75%, yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan kontrol (2,5%). Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas eugenol sebagai insektisida tunggal masih terbatas, terutama pada konsentrasi rendah (Tabel 1).

Tabel 1. Mortalitas *S. frugiperda* dalam 24 jam setelah diberi perlakuan Eugenol Tunggal dan Campurannya dengan Asam Lemak

Perlakuan (%)	Mortalitas (%)			
	Eugenol	EO	EL	EM
Kontrol	2,5 ± 1,445 b	3,75 ± 1,25 c	1,25 ± 1,25 c	0,0 ± 0,0 e
0,1	1,25 ± 1,25 b	7,50 ± 3,225 c	2,50 ± 2,50 c	8,75 ± 12,5 d
0,5	1,25 ± 1,25 b	80,0 ± 6,455 b	28,75 ± 5,545 b	22,50 ± 1,445 c
1	7,5 ± 1,445 b	92,50 ± 1,445 ab	93,75 ± 3,75 a	57,50 ± 3,225 b
2	8,75 ± 2,395 b	97,50 ± 1,445 a	96,25 ± 2,395 a	98,75 ± 1,25 a
5	30,0 ± 2,885 a	100,0 ± 0,0 a	96,25 ± 2,395 a	100,0 ± 0,0 a

Keterangan: Huruf yang sama dibelakang angka pada satu kolom menunjukkan tidak terdapat perbedaan menurut uji jarak berganda Tukey pada taraf 5%. EO (Eugenol + Asam Oleat); EL (Eugenol+Asam Laurat); EM (Eugenol+Asam Miristat)

Pengaruh Campuran Eugenol dan Asam Lemak (Asam Oleat, Asam Laurat dan Asam Miristat) (1:5) (w/w) terhadap Mortalitas Larva *S. frugiperda*

Pencampuran eugenol dengan asam lemak (asam oleat, asam laurat dan asam miristat) secara nyata meningkatkan mortalitas larva *S. frugiperda*. Hasil percobaan menunjukkan bahwa terdapat pengaruh nyata dari campuran eugenol dan asam oleat terhadap mortalitas larva *S. frugiperda*. Diantara semua konsentrasi yang diuji, hampir semuanya (0,5, 1,2 dan 5%) berpengaruh nyata terhadap mortalitas larva *S. frugiperda* (80-100%). Hanya perlakuan konsentrasi terendah yang diuji (0,1%) yang mortalitasnya tidak berbeda nyata dengan perlakuan kontrol. Hasil percobaan pada campuran eugenol dengan asam laurat terhadap mortalitas *S. frugiperda* pada perlakuan konsentrasi 0,5% telah menunjukkan hasil yang berbeda nyata dengan kontrol, yaitu sebesar 28,74%. Terjadi peningkatan mortalitas yang signifikan dari konsentrasi 1% (43,75%) hingga konsentrasi 2% (96,25%). Sementara itu, campuran dengan asam miristat pada konsentrasi terendah (0,1%), mortalitas larva yang dihasilkan telah menunjukkan hasil yang berbeda nyata dengan kontrol. Mortalitas yang sangat tinggi terjadi pada campuran eugenol dan asam miristat konsentrasi 2 dan 5% masing-masing 98,75% dan 100%. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa

penambahan asam lemak berperan penting dalam meningkatkan efektivitas eugenol terhadap larva *S. frugiperda*. Hasil percobaan menunjukkan bahwa mortalitas kumulatif larva *S. frugiperda* baik pada perlakuan eugenol tunggal maupun eugenol dan campurannya dengan asam lemak, menunjukkan peningkatan yang sangat cepat pada 24 jam setelah perlakuan (Gambar 1). Setelah periode tersebut, tidak terjadi peningkatan mortalitas yang berarti hingga akhir waktu pengamatan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar kematian larva terjadi pada fase awal setelah paparan.

Tabel 2 menunjukkan nilai LD₅₀ dan LD₉₉ dari perlakuan eugenol dan campurannya dengan beberapa asam lemak terhadap larva *S. frugiperda*. Eugenol tunggal memiliki nilai LD₅₀ sebesar 0,69 mg/gr larva. Di antara seluruh perlakuan kombinasi, perlakuan EO menunjukkan toksisitas tertinggi dengan nilai LD₅₀ terendah, yaitu 0,25 mg/gr larva, diikuti oleh EM sebesar 0,50 mg/gr larva, sedangkan EL memiliki nilai LD₅₀ sebesar 0,74 mg/gr larva. Berdasarkan nilai Synergistic Factor (SF), perlakuan EO dan EM menunjukkan efek sinergis dengan nilai SF masing-masing sebesar 2,76 dan 1,38, sementara perlakuan EL menunjukkan efek antagonis dengan nilai SF kurang dari 1,0, yaitu 0,93. Hasil ini mengindikasikan bahwa kombinasi EO merupakan perlakuan paling efektif karena mampu meningkatkan toksisitas eugenol secara signifikan dibandingkan perlakuan lainnya.

Tabel 2. Toksisitas Eugenol dan Campurannya dengan Asam Lemak terhadap *S. frugiperda* pada ratio 1:5 setelah 24 jam

Perlakuan	LD ₅₀ (mg/gr larva)	LD ₉₉ (mg/gr larva)	Slope ± S.E	Intercept ± S.E	X ²	Pvalue	SR
E	0,69 (0,64 - 0,73)	1,36 (1,25 - 1,51)	34,51 ± 2,81	2,38 ± 0,19	4,2208	0,000	
EO	0,25 (0,23 - 0,27)	0,56 (0,51 - 0,63)	74,16 ± 6,27	1,86 ± 0,15	21,7008	0,000	2,76
EL	0,74 (0,67 - 0,82)	1,88 (1,69 - 2,14)	20,52 ± 1,75	1,54 ± 0,14	10,2053	0,000	0,93
EM	0,50 (0,46 - 0,55)	1,05 (0,94 - 1,19)	37,39 ± 3,17	1,88 ± 0,14	8,1283	0,000	1,38

Keterangan: SR (Synergistic Ratio) LD₅₀ Eugenol Tunggal/LD₅₀ Campuran

Tabel 3. Data akumulasi aktivitas enzim detoksifikasi perlakuan eugenol dan campurannya dengan asam lemak

Perlakuan	Aktivitas spesifik enzim detoksifikasi (unit/mg)		
	CP450	Esterase	GST
Kontrol	47,02	294,34	104,65
E	52,54	242,91	126,98
EO	26,23	237,44	133,12
EL	39,49	233,98	126,70
EM	30,21	233,98	135,07

Keterangan: E: Eugenol; EO; Eugenol+Asam Oleat; EL: Eugenol+Asam Laurat; EM: Eugenol+Asam Miristat

Pengaruh Campuran Eugenol dan Asam Lemak (Asam Oleat, Asam Laurat dan Asam Miristat) (1:5) (w/w) terhadap Aktivitas Enzim pada Larva *S. frugiperda*

Hasil pengujian aktivitas enzim detoksifikasi menunjukkan pola yang berbeda untuk setiap enzim yang diuji (Tabel 3). Aktivitas CP450 pada perlakuan eugenol tunggal (E) sedikit meningkat (52,54 unit/mg) dibandingkan kontrol (47,02 unit/mg), namun seluruh perlakuan campuran eugenol dan asam lemak menunjukkan penurunan aktivitas CP450 di bawah nilai kontrol, dengan penurunan terbesar pada EO (26,23 unit/mg), diikuti EM (30,21 unit/mg) dan EL (39,49 unit/mg). Aktivitas esterase mengalami penurunan pada seluruh perlakuan eugenol dibandingkan kontrol (294,34 unit/mg), dengan penurunan lebih besar pada perlakuan campuran (233,98–237,44 unit/mg) dibandingkan eugenol tunggal (242,91 unit/mg), yang mengindikasikan bahwa penambahan asam lemak turut berkontribusi dalam menekan aktivitas esterase. Berbeda dengan kedua enzim tersebut, aktivitas GST meningkat pada seluruh perlakuan eugenol dibandingkan kontrol (104,65 unit/mg), dengan aktivitas tertinggi pada EM (135,07 unit/mg) dan EO (133,12 unit/mg).

4. Pembahasan

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pencampuran minyak atsiri dan asam lemak memiliki bioaktivitas lebih tinggi dibandingkan senyawa tunggalnya. Campuran eugenol dengan asam lemak rantai sedang (asam kaprilat, asam kaprat dan asam laurat) menunjukkan aktivitas bakterisidal yang lebih tinggi terhadap *Escherichia coli* dibandingkan perlakuan masing-masing senyawa (Kim & Rhee, 2016). Penelitian lain yang dilakukan oleh Satterlee *et al.* (2023) menunjukkan

bahwa campuran minyak atsiri kayu manis dengan asam butirrat mampu menghambat pertumbuhan *Aspergillus flavus*. Selain itu, campuran minyak atsiri tamanu *Calophyllum inophyllum* dengan asam oleat memberikan efek repelen yang lebih baik dibanding dengan masing-masing senyawa (Hieu *et al.*, 2014). Tkachenko & Varfolomeeva, (2025) melaporkan bahwa campuran minyak atsiri dari tanaman *Litsea cubeba*, *Cinnamomum verum* dan *Cymbopogon flexuosus* dengan minyak nabati *Azadirachta indica* L. mampu menekan jumlah keturunan trips sebesar 12-25% dibandingkan kontrol.

Penambahan asam lemak juga diketahui mampu meningkatkan efektivitas bahan aktif insektisida sintetis. Khot (2009) melaporkan bahwa asam linoleat dan asam oleat memiliki efek sinergi dengan permethrin pada rasio 4:1 dengan nilai LC₅₀ campuran masing-masing 413 dan 541 ppm. Sementara perlakuan permethrin secara tunggal nilai LC₅₀ mencapai 1630,7 ppm menjadi 413 dan 541 ppm. Asam lemak C8910 (campuran asam kaprilat, asam nonanoat, dan asam kaprat) mampu meningkatkan nilai toksisitas deltametrin pada ratio 5:1 hingga mencapai 20 kali (Ramadan *et al.*, 2022). Selain efek mortalitas, campuran asam oleat dengan *N,N-diethyl-m-toluamide* (DEET) memberikan efek repelen lebih baik dibanding dengan masing-masing senyawa tunggal terhadap lalat (*Stomoxys calcitrans*) (Hieu *et al.*, 2014). Penggunaan ratio 1:5, dimana bahan sinergis lebih besar dibandingkan dengan bahan aktif berkaitan dengan cara serangga memetabolisme dan mendetoksifikasi senyawa. Penelitian yang dilakukan oleh (Scalerandi *et al.*, 2018) menunjukkan bahwa system detoksifikasi serangga cenderung memetabolisme komponen mayor terlebih dahulu. Hal ini menyebabkan komponen minor (bahan aktif) lebih sedikit mengalami proses

detoksifikasi sehingga tetap bersifat toksik bagi serangga.

Perbedaan efek sinergisme diantara ketiga asam lemak diduga berkaitan erat dengan struktur kimianya masing-masing. Asam oleat (C18:1) yang bersifat tak jenuh serta memiliki ikatan rangkap. Struktur ini membuat molekul asam oleat menjadi lebih fleksibel dan memiliki ruang gerak yang lebih besar. Akibatnya, asam oleat lebih mudah bergerak di dalam membran dan mempercepat proses masuknya ke dalam tubuh organisme target (de Melo *et al.*, 2018). Panjang rantai dan jumlah ikatan rangkap yang dimiliki asam oleat mampu mengganggu susunan lipid serangga sehingga membran menjadi lebih mudah ditembus dan senyawa dapat masuk dengan lebih cepat ke dalam tubuh serangga (Desbois & Smith, 2010). Asam miristat (C14:0) dan asam laurat (12:0) yang bersifat jenuh dengan rantai lebih pendek tanpa ikatan rangkap, memiliki kemampuan yang lebih rendah dari asam oleat. Hal ini selaras dengan yang dilaporkan oleh Khot (2009) bahwa penggunaan asam lemak dengan rantai lebih panjang dan tak jenuh menunjukkan efek sinergis lebih kuat pada permethrin.

Penurunan aktivitas CP450 yang cukup besar pada perlakuan EO dan EM menunjukkan bahwa penambahan asam lemak, khususnya asam oleat dan asam miristat, berpotensi bertindak sebagai sinergis dengan menghambat proses detoksifikasi fase I (Scalerandi *et al.*, 2018). Enzim Cytochrome P450 monooxygenase berperan penting dalam metabolisme senyawa asing (xenobiotik), termasuk insektisida nabati. Oleh karena itu, penghambatan aktivitas enzim ini umumnya akan meningkatkan toksisitas senyawa aktif terhadap serangga sasaran (Liu *et al.*, 2026; Ruttanaphan *et al.*, 2019).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa eugenol tunggal cenderung sedikit menginduksi aktivitas P450 sebagai bentuk respons pertahanan serangga. Akan tetapi, kombinasi eugenol dengan asam lemak mampu menekan aktivitas enzim tersebut secara efektif sehingga berpotensi meningkatkan kerentanan serangga terhadap perlakuan yang diberikan (Adhikari *et al.*, 2022). Aktivitas esterase yang menurun pada seluruh perlakuan juga mengindikasikan bahwa eugenol mampu menghambat kerja enzim hidrolase tersebut (Caren *et al.*, 2025). Esterase memiliki peran penting dalam proses hidrolisis ester asam lemak dan berbagai xenobiotik yang masuk ke dalam tubuh serangga (Kumrungsee *et al.*, 2022). Peningkatan aktivitas GST pada seluruh perlakuan (E, EO, EM, dan EL) menunjukkan adanya respons detoksifikasi fase II atau mekanisme adaptasi

terhadap stres oksidatif yang ditimbulkan oleh paparan senyawa tersebut (Gao *et al.*, 2020; Kumrungsee *et al.*, 2022). Enzim GST merupakan enzim multifungsi yang berperan dalam mengkatalisis konjugasi glutathione tereduksi dengan senyawa elektrofilik hasil metabolisme xenobiotik sehingga menjadi lebih mudah larut dalam air dan dapat diekskresikan dari tubuh serangga (Gao *et al.*, 2020; Tarigan *et al.*, 2016).

Penambahan asam lemak sebagai bahan sinergis memungkinkan penurunan kebutuhan eugenol sebagai bahan aktif tanpa mengurangi daya toksiknya, sehingga mendapatkan hasil yang lebih efektif dengan biaya yang lebih rendah. Pemanfaatan bahan sinergis juga berkontribusi dalam menekan risiko resistensi pada serangga hama. Hal tersebut dibuktikan oleh beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa penambahan bahan sinergis dapat meningkatkan toksisitas dari bahan aktif terhadap populasi hama yang telah menunjukkan gejala resistensi.

Penggunaan eugenol dan asam lemak memberikan peluang pengembangan insektisida berbasis bahan alami untuk mengurangi ketergantungan pada insektisida sintesis. Hasil penelitian ini menjadi dasar ilmiah bagi penelitian selanjutnya yang diarahkan pada pengembangan formulasi yang lebih aplikatif dan sesuai untuk aplikasi lapang. Pengembangan formulasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan stabilitas, keamanan, serta kemudahan aplikasi campuran eugenol dan asam oleat, tanpa mengurangi efektivitasnya terhadap *S. frugiperda*.

5. Kesimpulan

Diantara ketiga kombinasi, campuran eugenol dengan asam oleat pada rasio 1:5 menunjukkan nilai toksisitas terbaik yaitu dengan LD₅₀ 0,25 mg/g larva dan nilai synergistic ratio 2,76 kali lebih toksik. Aktivitas spesifik enzim sitokrom P450 dan esterase menunjukkan penurunan pada kombinasi eugenol dengan asam lemak. Penemuan ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengembangan biopestisida khususnya terhadap larva *S. frugiperda*. Berdasarkan kajian ini maka direkomendasikan untuk studi lanjut mengenai mekanisme sinergisme antara dari senyawa asam lemak dengan eugenol dalam mengendalikan *S. frugiperda*.

7. Declaration of Conflicting Interests

The author declares that there is no potential conflict of interest in the research, writing and publication of this article.

6. Daftar Pustaka

- Adhikari, K., Khanikor, B., & Sarma, R. 2022. Persistent susceptibility of *Aedes aegypti* to eugenol. *Scientific Reports*, 12(1), 1–11. DOI: 10.1038/s41598-022-06302-8
- Almadiy, A. A. 2020. Chemical composition, insecticidal and biochemical effects of two plant oils and their major fractions against *Aedes aegypti*, the common vector of dengue fever. *Heliyon*, 6(9), e04915. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04915
- Asfiya, W., Nur, V., Subagyo, O., Dharmayanthi, A. B., Fatimah, & Rachmatiyah, R. 2020. Intensitas serangan *Spodoptera frugiperda* J . E . Smith (Lepidoptera : Noctuidae) pada pertanaman jagung di Kabupaten Garut dan Tasikmalaya , Jawa Barat. *Jurnal Entomologi Indonesia*, 17(3), 163–167. DOI: 10.5994/jei.17.3.163
- Caren, J., Zhu, Y. C., Read, Q. D., & Du, Y. 2025. Risk Assessment of Effects of Essential Oils on Honey Bees (*Apis mellifera* L.). *Insects* , 16(3). DOI: 10.3390/insects16030303
- Chang, J., Cao, C., & Gao, X. 2010. The effect of pretreatment with S , S , S-tributyl phosphorotrithioate on deltamethrin resistance and carboxylesterase activity in *Aphis gossypii* (Glover) (Homoptera : Aphididae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 98(2), 296–299. DOI: 10.1016/j.pestbp.2010.06.021
- Chen, J., Liu, Y., Ma, G., Yang, F., Zhan, Z., Guan, L., Kuang, W., Wang, J., Li, J., Han, F., & Jin, L. 2023. Piperonyl butoxide synergizes the larvicidal activity of *Origanum vulgare* essential oil and its major constituents against the larvae of *Aedes albopictus* and *Culex pipiens quinquefasciatus*. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 26(1), 102025. DOI: 10.1016/j.aspen.2022.102025
- Coelho, R. A., Vieira, T. F., Pereira, R. B., Pereira, D. M., Castanheira, E. M. S., Sousa, S. F., Jos, M., Fernandes, G., & Gonçalves, M. S. T. 2022. Synthesis, Insecticidal Activity and Computational Studies of Eugenol-Based Insecticides. *Chemistry Proceedings*, 1–9. DOI: 10.3390/ecsoc-26-13649
- Da Camara, C. A. G., Doboszewski, B., De Melo, J. P. R., Nazarenko, A. Y., Dos Santos, R. B., & Moraes, M. M. 2022. Novel Insecticides from Alkylated and Acylated Derivatives of Thymol and Eugenol for the Control of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 33(2), 196–204. DOI: 10.21577/0103-5053.20210137
- Day, R., Abrahams, P., Bateman, M., Beale, T., Clottey, V., Cock, M., Colmenarez, Y., Corniani, N., Early, R., Godwin, J., Gomez, J., Moreno, P. G., Murphy, S. T., Oppong-Mensah, B., Phiri, N., Pratt, C., Silvestri, S., & Witt, A. 2017. Fall armyworm: Impacts and implications for Africa. *Outlooks on Pest Management*, 28(5), 196–201. DOI: 10.1564/v28_oct_02
- de Melo, A. R., Garcia, I. J. P., Serrao, J. A., Santos, H. L., Lima, L. A. R. dos S., & Alves, S. N. 2018. Toxicity of different fatty acids and methyl esters on *Culex quinquefasciatus* larvae. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 154(February), 1–5. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.02.009
- Desbois, A. P., & Smith, V. J. 2010. Antibacterial Free Fatty Acids : Activities ,Mechanisms of Action and Biotechnological Potential. *Appl Microbiol Biotechnol*, (85), 1629–1642. DOI:10.1007/s00253-009-2355-3
- Dono, D., Ismayana, S., Idar, I., Prijono, D., & Muslikha, I. 2010. Status dan Mekanisme Resistensi Biokimia *Crociodomia pavonana* (F.) (Lepidoptera: Crambidae) terhadap Insektisida Organofosfat serta Kepekaannya terhadap Insektisida Botani Ekstrak Biji *Barringtonia asiatica*. *Jurnal Entomologi Indonesia*, 7(1), 9. DOI: 10.5994/jei.7.1.9
- Eldesouky, S. E., Khamis, W. M., & Hassan, S. M. 2019. Joint action of certain fatty acids with selected insecticides against cotton leafworm, *Spodoptera littoralis* and their effects on biological aspects. *Journal of Basic and Environmental Sciences*, 6(1), 23–32. DOI: 10.21608/jbes.2019.370579
- Fateha, R. N., Grasela, M., Ichwan, M. N., Purwanti, E. W., & Kurniasari, I. 2020. Larvicidal and antifeedant activities of clove leaf oil against *Spodoptera litura* (F.) on soybean. *Jurnal Hama Dan Penyakit Tumbuhan Tropika*, 21(1), 20–25. DOI: 10.23960/j.hppt.12120-25
- Fernandes, M. J. G., Pereira, R. B., Rodrigues, A. R. O., Vieira, T. F., Fortes, A. G., Pereira, D. M., Sousa, S. F., Gonçalves, M. S. T., & Castanheira, E. M. S. 2022. Liposomal Formulations Loaded with a Eugenol Derivative for Application as Insecticides: Encapsulation Studies and In Silico Identification of Protein Targets. *Nanomaterials*, 12(20). DOI: 10.3390/nano12203583
- Francis, S., Irvine, W., Impoinvil, L. M., Vizcaino, L., Poupardin, R., Lenhart, A., Paine, M. J. I., & Delgoda, R. 2025. Evaluating the potential of *Kalanchoe pinnata* , *Piper amalago* ,

- and other botanicals as economical insecticidal synergists against *Anopheles gambiae*. *Malaria Journal*. DOI: 10.1186/s12936-025-05254-4
- Gao, S., Zhang, K., Wei, L., Wei, G., Xiong, W., Lu, Y., Zhang, Y., Gao, A., & Li, B. 2020. Insecticidal Activity of *Artemisia vulgaris* Essential Oil and Transcriptome Analysis of *Tribolium castaneum* in Response to Oil Exposure. *Frontiers in Genetics*, 11(June), 1–19. DOI: 10.3389/fgene.2020.00589
- Ghaderi, A., Baniardalani, M., & Basseri, H. R. 2021. Level of Pyrethroid-resistance Associated with Cytochrome P450 Expression in German Cockroach *Blattella germanica* (Blattodea: Ectobiidae) in the Field Collected Strains. *Journal of Arthropod-Borne Diseases*, 15(2), 152–161. DOI: 10.18502/jad.v15i2.7484
- Hieu, T. T., Choi, S., Kim, S., & Ahn, Y. 2014. Enhanced repellency of binary mixtures of *Calophyllum inophyllum* nut oil fatty acids or their esters and three terpenoids to *Stomoxys calcitrans*. *Pest Management Science*, 71(9). DOI: 10.1002/ps.3904
- Ikawati, S., Himawan, T., Abadi, A. L., Tarno, H., & Fajarudin, A. 2022. In Silico Study of Eugenol and Trans-Caryophyllene also Clove Oil Fumigant Toxicity on *Tribolium castaneum*. *Journal of Tropical Life Science*, 12(3), 339–349. DOI: 10.11594/jtls.12.03.07.S
- Kalqutny, S. H., Nonci, N., & Muis, A. 2021. The incidence of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* J. E. Smith (FAW) (Lepidoptera: Pyralidae), a newly invasive corn pest in Indonesia. *Eart and Environmental Science*. DOI: 10.1088/1755-1315/911/1/012056
- Kassie, M., Wossen, T., De Groote, H., Tefera, T., Sevgan, S., & Balew, S. 2020. Economic impacts of fall armyworm and its management strategies: Evidence from southern Ethiopia. *European Review of Agricultural Economics*, 47(4), 1473–1501. DOI: 10.1093/erae/jbz048
- Khot, A. 2009. *The Use of Botanical Synergists to Increase the Efficacy of Natural Pyrethrins* (Number June). Imperial Collage London.
- Kim, S. A., & Rhee, M. S. 2016. Highly enhanced bactericidal effects of medium chain fatty acids (caprylic, capric, and lauric acid) combined with edible plant essential thymol, and vanillin) against *Escherichia coli* O157: H7. *Food Control*, 60, 447–454. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.08.022
- Kiran, S. R., Reddy, A. S., Devi, P. S., & Reddy, K. J. 2006. Insecticidal, antifeedant and oviposition deterrent effects of the essential oil and individual compounds from leaves of *Chloroxylon swietenia* DC. *Pest Management Science*, 62, 1116–1121. DOI: 10.1002/ps
- Kumrungsee, N., Dunkhunthod, B., Manoruang, W., Koul, O., Pluempanupat, W., Kainoh, Y., Yooboon, T., Piyasaengthong, N., Bullangpoti, V., & Nobsathian, S. 2022. Synergistic interaction of thymol with *Piper ribesoides* (Piperales: Piperaceae) extracts and isolated active compounds for enhanced insecticidal activity against *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae). *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 1–11. DOI: 10.1186/s40538-022-00306-2
- Liu, S., Carballo-Arce, A. F., Wang, Z., Durst, T., Sims, S. R., Arnason, J. T., & Scott, I. M. 2026. Evaluation of Novel Dillapiol Analogs as Insect Detoxification Enzyme Inhibitors and Insecticide Synergists †. *Insects*, 17(3), 1–14. DOI: 10.3390/insects17030351
- Montezano, D. G., Specht, A., Sosa-Gómez, D. R., Roque-Specht, V. F., Sousa-Silva, J. C., Paula-Moraes, S. V., Peterson, J. A., & Hunt, T. E. 2018. Host Plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. In *African Entomology* (Vol. 26, Number 2, pp. 286–300). Entomological Society of Southern Africa. DOI: 10.4001/003.026.0286
- Mukkun, L., Kleden, Y. L., & Simamora, A. V. 2021. Detection of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize field in East Flores District, East Nusa Tenggara Province, Indonesia. *International Journal of Tropical Drylands*, 5(1), 20–26. DOI: 10.13057/tropdrylands/t050104
- Ramadan, G. R. M., Zhu, K. Y., & Phillips, T. W. 2022. Synergism of deltamethrin with a mixture of short chain fatty acids for toxicity against pyrethroid-resistant and susceptible strains of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 184(April), 105132. DOI: 10.1016/j.pestbp.2022.105132
- Rismayani, R., & Laba, I. W. 2016. The effectivity of citronella and clove oils against cabbage caterpillar *Crociodomia pavonana*. *Buletin Penelitan Tanaman Rempah Dan Obat*, 26(2), 109. DOI: 10.21082/bullitro.v26n2.2015.109-116
- Ruttanaphan, T., Pluempanupat, W., Aungsirirawat, C., Boonyarit, P., Goff, G. Le, Bullangpoti, V., & Isman, M. 2019. Effect of Plant Essential Oils and Their Major Constituents on Cypermethrin Tolerance Associated Detoxification Enzyme Activities in *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 112(5), 2167–2176.

- DOI: 10.1093/jee/toz126
- Satterlee, T., Mcdonough, C. M., Gold, S. E., Chen, C., Glenn, A. E., & Pokoo-aikins, A. 2023. Synergistic Effects of Essential Oils and Organic Acids against *Aspergillus flavus* Contamination in Poultry Feed. *Toxins*, 15(635), 1–11. DOI: doi.org/10.3390/toxins15110635
- Scalerandi, E., Flores, G. A., Palacio, M., Defagó, M. T., Carpinella, M. C., Valladares, G., Bertoni, A., & Maggi, F. 2018. Understanding Synergistic Toxicity of Terpenes as Insecticides: Contribution of Metabolic Detoxification in *Musca domestica*. *Frontiers in Microbiology*, 9(October), 1–9. DOI: 10.3389/fpls.2018.01579
- Subagyo, V. N. O., Rahmini, Fatimah, Samudra, I. M., Sutrisno, H., & Hidayat, P. 2024. Fall armyworm infestation intensity on maize vegetative stages in Banten , West Java , and Central Java , Indonesia Fall armyworm infestation intensity on maize vegetative stages in Banten , West Java , and Central Java , Indonesia. *Eart and Environmental Science*. DOI: 10.1088/1755-1315/1494/1/012010
- Tak, J. H., & Isman, M. B. 2015. Enhanced cuticular penetration as the mechanism for synergy of insecticidal constituents of rosemary essential oil in *Trichoplusia ni*. *Scientific Reports*, 5(April), 1–10. DOI: 10.1038/srep12690
- Tarigan, S. I., Dadang, & Sakti Harahap, I. 2016. Toxicological and physiological effects of essential oils against *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) and *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Biopesticides*, 9(2), 135–147. DOI: 10.57182/jbiopestic.9.2.135-147
- Tkachenko, K. G., & Varfolomeeva, E. A. 2025. A mixture of fatty and essential plant oils to protect plants from flower thrips in greenhouses. 14–17. DOI: 10.25630/PAV.2025.99.14.001
- Vargas-Méndez, L. Y., Sanabria-Flórez, P. L., Saavedra-Reyes, L. M., Merchan-Arenas, D. R., & Kouznetsov, V. V. (2019). Bioactivity of semisynthetic eugenol derivatives against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae infesting maize in Colombia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1613–1620. DOI: 10.1016/j.sjbs.2018.09.010
- Wahba, M. N., Abdelatef, E. A., & Wahba, T. F. 2022. The potency of nanoemulsion of Clove oil and their main component Eugenol on some biochemical and histological aspects on *Spodoptera littoralis* (Boisd) (Lepidoptera: Noctuidae). *Middle East Journal of Applied Sciences*, 532–543. DOI:10.36632/mejas/2022.12.4.37
- Widayani, N. S., Dono, D., Hidayat, Y., Ishmayana, S., & Syahputra, E. 2023. Toxicity of Calophyllum soulattri , Piper aduncum , Sesamum indicum and their potential mixture for control *Spodoptera frugiperda*. *De Gruyter*. DOI: 10.1515/opag-2022-0213
- Yu, J., Lee, S., Lee, C., & Wang, C. 2025. Multiple mechanisms associated with deltamethrin and imidacloprid resistance in field-collected common bed bug , *Cimex lectularius* L . *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 210(December 2024), 106357. DOI: 10.1016/j.pestbp.2025.106357