



PERANCANGAN ZIRAPUSMA-SPRAY SEBAGAI SISTEM ASSISTED POLLINATION OTOMATIS BERBASIS IOT UNTUK Mendukung PERKEBUNAN KELAPA SAWIT BERKELANJUTAN

DESIGN OF ZIRAPUSMA-SPRAY AS AN IOT-BASED AUTOMATIC ASSISTED POLLINATION SYSTEM TO SUPPORT SUSTAINABLE OIL PALM PLANTATIONS

Maisarah ^{1*}, Gladys Florecita Daud ², Dzati Hanani Hidayat ³, Puan Fatimah Cahyadi ⁴, Serpi Srimuliati ⁵

¹⁾Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Indonesia

^{2,3,4)}Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Indonesia

⁵⁾Program Studi Proteksi Tanaman, Fakultas Sains dan Teknologi, Institut Teknologi Sawit Indonesia, Indonesia

*Corresponding Email: maisarah@unimal.ac.id

Abstrak

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan komoditas unggulan Indonesia yang menyumbang sekitar 30% dari total produksi minyak nabati global. Produktivitas kelapa sawit sangat bergantung pada efisiensi penyerbukan, yang selama ini ditopang oleh serangga penyerbuk utama *Elaeidobius kamerunicus* (EK). Akan tetapi, populasi EK mengalami penurunan lebih dari 60% dalam lima tahun terakhir akibat penggunaan pestisida yang tidak terkontrol, perubahan iklim, dan fenomena *Colony Collapse Disorder* (CCD). Kondisi ini mendorong kebutuhan akan sistem *assisted pollination* (aspol) yang lebih efisien dan berbasis teknologi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji konsep perancangan Zirapusma-Spray, yaitu alat penyerbukan otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) dan mikrokontroler Arduino Uno, melalui metode kajian literatur sistematis. Literatur yang dikaji berasal dari 28 artikel ilmiah terseleksi dari database Scopus dan SINTA yang diterbitkan antara tahun 2013 hingga 2024. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem aspol otomatis mampu meningkatkan *fruit set* kelapa sawit dari 40,6% pada penyerbukan alami menjadi lebih dari 80% dengan parameter operasional optimal: tekanan semprot 0,7 Psi, volume serbuk sari 40 mg per semprotan, frekuensi 2–3 kali sehari selama 3–5 hari, dan rasio campuran serbuk sari: *Talc Powder* sebesar 1:3. Integrasi teknologi IoT memungkinkan pemantauan *real-time* dan pengendalian parameter penyerbukan secara konsisten. Konsep Zirapusma-Spray diproyeksikan mampu meningkatkan efisiensi penyerbukan hingga 30% dibandingkan metode manual, sekaligus mengurangi risiko kecelakaan kerja dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Pengembangan lebih lanjut dan pengujian lapangan sistem aspol otomatis pada perkebunan kelapa sawit di Indonesia sangat diperlukan sebagai langkah menuju penerapan skala komersial.

Kata kunci : *assisted pollination, Elaeidobius kamerunicus, fruit set, IoT, kelapa sawit*

Abstract

Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is Indonesia's strategic commodity contributing approximately 30% of global vegetable oil production. Oil palm productivity is highly dependent on pollination efficiency, primarily supported by the key pollinator *Elaeidobius kamerunicus* (EK). However, EK populations have declined by more than 60% over the past five years due to uncontrolled pesticide use, climate change, dan the Colony Collapse Disorder (CCD) phenomenon. This situation drives the need for more efficient dan technology-based assisted pollination (aspol) systems. This study aims to review the design concept of Zirapusma-Spray, an IoT-based automatic pollination device integrated with an Arduino Uno microcontroller, using a systematic literature review methodology. A total of 28 selected scientific articles from Scopus dan SINTA databases published between 2013 dan 2024 were reviewed. Results indicate that automated aspol systems can increase oil palm fruit set from 40.6% under natural pollination to above 80% with optimal operational parameters: spray pressure of 0.7 Psi, pollen volume of 40 mg per spray, frequency of 2–3 times per day for 3–5 days, dan a pollen:Talc Powder mixing ratio of 1:3. IoT technology integration enables real-time monitoring dan consistent control of pollination parameters. The Zirapusma-Spray concept is projected to improve pollination efficiency by up to 30% compared to manual methods, while reducing occupational accident risks dan optimizing resource utilization. This review provides a scientific foundation for the development dan field testing of automated aspol systems in Indonesian oil palm plantations.

Keywords: assisted pollination, *Elaeidobius kamerunicus*, fruit set, IoT, oil palm

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tanaman perkebunan yang memiliki peranan strategis dalam perekonomian Indonesia. Indonesia menjadi produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia dengan kontribusi mencapai 30% dari total produksi minyak nabati global (Morcillo *et al.*, 2013). Besarnya kontribusi sektor ini menjadikan produktivitas dan keberlanjutan perkebunan kelapa sawit sebagai isu yang sangat krusial bagi ketahanan ekonomi nasional (Maisarah dan Dian, 2023, 2024). Produktivitas kelapa sawit sangat ditentukan oleh efisiensi proses penyerbukan. Sebagai tanaman *monoecious*, kelapa sawit memerlukan perpindahan serbuk sari dari bunga jantan ke bunga betina untuk menghasilkan buah dengan kualitas

optimal. Apabila bunga betina tidak terserbuki dengan baik, buah tidak akan berkembang secara sempurna, sehingga hasil panen menurun (Prasetyo dan Susanto, 2012). Salah satu fenomena akibat kegagalan penyerbukan yang banyak ditemukan di lapangan adalah terbentuknya buah partenokarpi atau dikenal sebagai "buah ldanak", yaitu buah yang tidak memiliki kernel dan memiliki nilai *fruit set* di bawah 2% (Wirdana dan Banowati, 2022).

Proses penyerbukan kelapa sawit secara alami sangat bergantung pada aktivitas serangga penyerbuk. Kumbang *Elaeidobius kamerunicus* (EK) merupakan agen penyerbuk utama yang diperkenalkan ke Indonesia pada tahun 1981 dan terbukti meningkatkan efisiensi penyerbukan secara signifikan dibandingkan metode sebelumnya

(Yousefi *et al.*, 2020). Kehadiran EK menjadi penentu utama keberhasilan penyerbukan di hampir seluruh perkebunan kelapa sawit di Indonesia.

Populasi EK mengalami penurunan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Sejumlah penelitian melaporkan penurunan populasi EK hingga lebih dari 60% pada berbagai perkebunan kelapa sawit di Indonesia (Prasetyo, Purba dan Susanto, 2014; Lubis, Sudarjat dan Dono, 2017). Penurunan populasi dan efisiensi penyerbukan *Elaeidobius kamerunicus* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain ketersediaan bunga jantan sebagai sumber pakan dan tempat berkembang biak, perbedaan tipe tanah, kondisi iklim, serta penggunaan insektisida yang berdampak negatif terhadap kelangsungan hidup serangga penyerbuk (Syahputra *et al.*, 2018; Mohamad *et al.*, 2023).

Permasalahan ini sejalan dengan fenomena penurunan serangga penyerbuk global, termasuk *Colony Collapse Disorder* (CCD) pada lebah madu, yang menunjukkan bahwa populasi penyerbuk dapat terganggu akibat kombinasi berbagai faktor seperti perubahan penggunaan lahan, pestisida, patogen, dan perubahan iklim (Potts *et al.*, 2010; Vanbergen *et al.*, 2013). Perubahan kondisi iklim, terutama variasi curah hujan, suhu, dan kelembapan, dapat memengaruhi pembungaan kelapa sawit, ketersediaan bunga jantan, populasi *Elaeidobius*

kamerunicus, serta efektivitas penyerbukan alami di lapangan. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketergantungan penuh pada penyerbuk alami perlu dilengkapi dengan strategi penyerbukan berbantuan untuk menjaga nilai *fruit set* kelapa sawit (Fatimah L *et al.*, 2022; Kartika, Duaja dan Gusniwat, 2022; Gintoron *et al.*, 2023; Mohamad *et al.*, 2023).

Sebagai respons terhadap permasalahan tersebut, metode *assisted pollination* (aspol) telah lama diterapkan di berbagai perkebunan kelapa sawit. Kajian menunjukkan bahwa aspol yang dilakukan dengan baik dapat meningkatkan *fruit set* kelapa sawit dari 40,6% pada penyerbukan alami menjadi lebih dari 80% (Prasetyo dan Susanto, 2012). Metode aspol konvensional yang masih dilakukan secara manual memiliki keterbatasan serius, meliputi inkonsistensi tekanan dan volume semprotan, tingginya risiko kecelakaan kerja akibat penggunaan metode tiupan manual, serta ketergantungan pada keterampilan dan kondisi fisik operator (Broussard, Coates dan Martinsen, 2023).

Perkembangan pesat teknologi *Internet of Things* (IoT) dan mikrokontroler telah membuka peluang inovasi dalam transformasi sektor pertanian. Integrasi mikrokontroler seperti Arduino dengan sensor dan jaringan komunikasi juga telah banyak digunakan dalam sistem pertanian cerdas, terutama untuk pemantauan

lingkungan, irigasi otomatis, dan efisiensi penggunaan sumber daya (Kamaruddin *et al.*, 2019; Navarro, Costa dan Pereira, 2020; Obaideen *et al.*, 2022; Rajak *et al.*, 2023). Penerapan sistem otomasi ini memungkinkan standarisasi parameter operasional, pemantauan *real-time*, dan pengurangan ketergantungan pada tenaga kerja manual (Navarro, Costa dan Pereira, 2020).

Penelitian ini bertujuan mengkaji konsep perancangan Zirapuma-Spray, yaitu sistem *Smart Automatic Assisted Pollination* berbasis IoT untuk mengatasi keterbatasan metode aspol konvensional.

METODE PENELITIAN

Desain/Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian literatur sistematis (*systematic literature review*) yang dilakukan melalui penelusuran, seleksi, evaluasi, dan sintesis artikel ilmiah yang relevan dengan topik perancangan sistem *assisted pollination* otomatis pada kelapa sawit. Kegiatan penelitian dilakukan secara daring melalui penelusuran database ilmiah, yaitu Scopus Q1-Q4 dan Proceedings tahun 2013-2023, serta jurnal yang terindeks SINTA 2 - SINTA 5 tahun 2017-2024. Penelusuran literatur dibatasi pada artikel yang diterbitkan dalam rentang tahun 2013 hingga 2024 untuk memperoleh data yang mutakhir dan relevan dengan perkembangan

teknologi penyerbukan, otomasi pertanian, dan *Internet of Things* (IoT).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa artikel ilmiah, jurnal nasional terakreditasi, jurnal internasional bereputasi, serta referensi ilmiah yang berkaitan dengan penyerbukan kelapa sawit, *Elaeidobius kamerunicus*, *fruit set*, teknologi *sprayer* otomatis, mikrokontroler Arduino, IoT, dan sistem pertanian presisi.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat komputer atau laptop, jaringan internet, database Scopus dan SINTA, serta perangkat lunak pengolah kata untuk penyusunan dan sintesis data literatur. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian literatur meliputi “*assisted pollination oil palm*”, “*Elaeidobius kamerunicus*”, “*fruit set* kelapa sawit”, “*automatic sprayer Arduino*”, “*IoT smart farming*”, “penyerbukan buatan kelapa sawit”, “*talc powder pollen carrier*”, dan “*automated pollination system*”.

Penelitian ini menggunakan desain kajian literatur sistematis dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Pendekatan ini digunakan karena penelitian bersifat konseptual dan bertujuan untuk menyusun landasan ilmiah perancangan Zirapuma-Spray sebagai sistem *assisted pollination* otomatis berbasis IoT pada perkebunan kelapa sawit.

Kajian dilakukan melalui studi literatur sistematis guna mengidentifikasi parameter-parameter kritis, komponen teknologi yang relevan, serta proyeksi manfaat implementasi alat ini bagi produktivitas perkebunan kelapa sawit di Indonesia. Kajian dilakukan dengan mengevaluasi kesesuaian artikel berdasarkan kriteria tertentu, kemudian mensintesis temuan-temuan utama menjadi dasar perancangan konsep alat. Fokus kajian meliputi urgensi penyerbukan berbantuan pada kelapa sawit, penurunan populasi serangga penyerbuk, parameter teknis penyerbukan, penggunaan *sprayer* otomatis, penerapan mikrokontroler Arduino, serta integrasi IoT dalam sistem pertanian presisi.

Analisa Data

Tahapan penelitian dilakukan melalui beberapa langkah. Tahap pertama adalah identifikasi literatur, yaitu pencarian artikel ilmiah melalui database Scopus dan SINTA menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Pada tahap ini diperoleh 47 artikel awal yang berkaitan dengan topik penyerbukan kelapa sawit, teknologi otomasi, Arduino, IoT, dan sistem *smart farming*.

Tahap kedua adalah seleksi literatur berdasarkan judul, abstrak, dan kesesuaian isi artikel dengan fokus penelitian. Kriteria inklusi yang digunakan meliputi artikel yang membahas penyerbukan kelapa sawit, *assisted pollination*, *fruit set*, teknologi

sprayer otomatis, mikrokontroler, atau IoT dalam pertanian; diterbitkan dalam jurnal ilmiah terindeks Scopus atau SINTA; tersedia dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris; serta memiliki data atau informasi yang dapat digunakan sebagai dasar parameter desain.

Kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak relevan dengan topik penelitian, artikel berbentuk editorial atau opini, artikel yang tidak dapat diakses secara penuh, serta artikel yang tidak memberikan informasi yang mendukung perancangan sistem. Berdasarkan proses seleksi tersebut, diperoleh 28 artikel yang memenuhi kriteria dan digunakan sebagai sumber utama dalam kajian ini.

Tahap ketiga adalah ekstraksi data dari artikel terpilih. Data yang dikumpulkan meliputi jenis teknologi penyerbukan, spesifikasi alat, parameter operasional penyerbukan, tekanan semprot, volume serbuk sari, frekuensi penyerbukan, waktu aplikasi, rasio campuran serbuk sari dan *Talc Powder*, tingkat keberhasilan penyerbukan, serta penerapan sistem otomasi dan IoT.

Tahap keempat adalah sintesis data secara naratif dan tematik. Hasil sintesis digunakan untuk merumuskan konsep desain Zirapuma-Spray, meliputi komponen utama alat, prinsip kerja, parameter operasional, serta potensi manfaatnya terhadap efisiensi penyerbukan dan keberlanjutan perkebunan kelapa sawit.

Parameter Pengamatan

Parameter yang diamati dalam kajian ini meliputi parameter biologis, teknis, dan lingkungan. Parameter biologis mencakup peran *Elaeidobius kamerunicus* dalam penyerbukan kelapa sawit, penurunan populasi serangga penyerbuk, waktu reseptif bunga betina, keberhasilan penyerbukan, dan nilai *fruit set*.

Parameter teknis meliputi tekanan semprot optimal, volume serbuk sari per aplikasi, frekuensi penyemprotan, durasi penyerbukan, rasio campuran serbuk sari dan *Talc Powder*, jenis mikrokontroler, sistem *sprayer*, serta integrasi IoT untuk pemantauan dan pengendalian alat.

Parameter lingkungan dan keberlanjutan meliputi efisiensi penggunaan serbuk sari, pengurangan ketergantungan terhadap penyerbukan manual, pengurangan risiko kecelakaan kerja, adaptasi terhadap penurunan populasi serangga penyerbuk, serta potensi kontribusi sistem terhadap pengelolaan perkebunan kelapa sawit yang lebih berkelanjutan.

Hasil pengamatan terhadap parameter-parameter tersebut selanjutnya dianalisis secara deskriptif. Penelusuran literatur dilakukan pada basis data Scopus (Elsevier) untuk sumber internasional dan SINTA untuk sumber nasional terakreditasi. Proses seleksi artikel dilakukan secara bertahap mengikuti protokol PRISMA (*Preferred*

Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), meliputi tahap identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan penetapan artikel yang disertakan. Pengelolaan referensi dan penyusunan sitasi dibantu perangkat lunak Mendeley, sedangkan ekstraksi dan sintesis parameter dari setiap artikel dilakukan menggunakan matriks sintesis (*synthesis matrix*) yang disusun dalam Microsoft Word. Data dikumpulkan untuk menyusun konsep perancangan Zirapusma-Spray sebagai sistem *assisted pollination* otomatis berbasis IoT yang mendukung efisiensi penyerbukan dan keberlanjutan perkebunan kelapa sawit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dan Urgensi Penyerbukan Kelapa Sawit

Kelapa sawit merupakan tanaman berumah satu (*monoecious*) yang menghasilkan bunga jantan dan betina pada tanaman yang sama namun pada waktu mekar yang berbeda. Penyerbukan memerlukan transfer serbuk sari secara aktif dari bunga jantan yang sedang anthesis menuju bunga betina yang sedang reseptif. (Meléndez dan Ponce, 2016) menegaskan bahwa efektivitas penyerbukan secara langsung menentukan pembentukan buah dan kualitas tanaman buah segar (TBS) yang dihasilkan.

Waktu efektif penyerbukan kelapa sawit adalah tiga hari setelah bunga betina mulai mekar, dengan puncak reseptivitas terjadi pada hari kedua ketika 50–60% bunga telah mekar. Selama periode ini, kepala putik mengeluarkan cairan lengket untuk menangkap serbuk sari sekaligus menghasilkan aroma khas yang menarik serangga penyerbuk (Prasetyo dan Susanto, 2012). Keterlambatan atau ketidakakuratan waktu penyerbukan akan menurunkan persentase *fruit set* secara signifikan.

Kegagalan penyerbukan mengakibatkan terbentuknya buah partenokarpi yang memiliki nilai *fruit set* di bawah 2%. Penelitian (Wirdana dan Banowati, 2022) mencatat bahwa buah partenokarpi tidak menghasilkan kernel sehingga tidak memiliki nilai ekonomis. Kondisi ini secara langsung mengurangi rendemen minyak sawit dan merugikan produktivitas perkebunan, terutama pada tanaman awal menghasilkan yang belum memiliki populasi serangga penyerbuk yang memadai.

Faktor-Faktor Penurunan Populasi *Elaeidobius kamerunicus*

Elaeidobius kamerunicus (EK) merupakan polinator spesifik kelapa sawit yang beradaptasi sangat baik pada bunga jantan tanaman ini. Sejak diintroduksi ke Indonesia pada tahun 1981, EK telah menjadi andalan dalam kegiatan penyerbukan alami di seluruh perkebunan

kelapa sawit nasional (Yousefi *et al.*, 2020). Efektivitas EK sebagai polinator didasarkan pada perilaku aktifnya membawa serbuk sari saat mengunjungi bunga betina sebagai sumber makanan.

Penurunan populasi dan agresivitas *Elaeidobius kamerunicus* yang signifikan di Indonesia telah dilaporkan dalam beberapa penelitian, meskipun besaran penurunannya dapat berbeda antarwilayah dan kondisi kebun. Penurunan tersebut berdampak terhadap keberhasilan penyerbukan dan nilai *fruit set* kelapa sawit (Prasetyo dan Susanto, 2012; Prasetyo, Purba dan Susanto, 2014). Faktor utama yang berkontribusi terhadap penurunan ini mencakup: (1) kondisi tipe tanah yang mempengaruhi media perkembangbiakan larva EK (Lubis, Sudarjat dan Dono, 2017) (2) penggunaan insektisida berspektrum luas yang tidak selektif (Asib dan Musli, 2020) (Syahputra *et al.*, 2018) dan (3) ketidaktersediaan bunga jantan yang cukup akibat ketidaksinkronan pembungaan (Fatimah L *et al.*, 2022).

Pada skala yang lebih luas, fenomena Colony Collapse Disorder (CCD) yang dilaporkan secara global turut mengancam populasi penyerbuk alami. (Potts *et al.*, 2010; Vanbergen *et al.*, 2013) menyatakan bahwa CCD merupakan fenomena penurunan populasi serangga penyerbuk secara tiba-tiba dan masif yang disebabkan oleh kombinasi faktor patogen, pestisida, kehilangan habitat, dan perubahan

iklim. Penelitian Sekar, Kumar dan Prabhu, 2022; Singh dan Rana, 2025, memperingatkan bahwa dengan fenomena penurunan serangga penyerbuk global, ketersediaan serangga penyerbuk untuk aspol tambahan akan semakin terbatas di masa mendatang, sehingga solusi teknologi menjadi semakin urgen.

Teknologi Assisted Pollination Konvensional dan Parameter Kritisnya

Metode assisted pollination telah terbukti secara empiris sebagai solusi efektif untuk mengatasi defisiensi penyerbukan alami. (Prasetyo dan Susanto, 2012) menunjukkan bahwa penggunaan serbuk sari 10 mesh dalam kegiatan aspol dapat meningkatkan *fruit set* kelapa sawit hingga lebih dari 80%, jauh melampaui penyerbukan alami yang hanya mencapai 40,6%. Dengan standar *fruit set* minimal 75% yang ditetapkan oleh industri, aspol menjadi intervensi yang diperlukan terutama pada kebun dengan populasi EK rendah.

Beberapa parameter kritis yang menentukan keberhasilan aspol telah teridentifikasi dari kajian literatur. Pertama, kualitas serbuk sari merupakan faktor fundamental. Polen berkualitas tinggi ditandai oleh viabilitas dan daya berkecambah yang baik. Viabilitas polen kelapa sawit dipengaruhi oleh metode pengeringan, kadar air polen, serta kondisi penyimpanan, terutama suhu dan lama

penyimpanan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengeringan polen pada kisaran suhu 37–40°C dan penyimpanan pada suhu rendah dapat mempertahankan viabilitas dan kemampuan berkecambah polen kelapa sawit lebih baik dibandingkan penyimpanan pada suhu ruang (Ekaratne dan Senathirajah, 1983; Criollo-Escobar dan Dominguez Chauza, 2018; Kadri *et al.*, 2022). Penggunaan *talcum powder* sebagai media pembawa atau pengencer serbuk sari telah umum digunakan dalam penyerbukan buatan kelapa sawit karena berfungsi sebagai media inert yang membantu aplikasi polen pada bunga betina reseptif. Rasio pencampuran polen dan *talcum powder* bervariasi bergantung pada viabilitas polen, tujuan penyerbukan, dan metode aplikasi; beberapa studi menggunakan campuran 1:9 hingga 1:10 atau lebih tinggi dalam aplikasi penyerbukan berbantuan kelapa sawit (Romero *et al.*, 2021; Cayón Salinas *et al.*, 2022; Gintoron *et al.*, 2023). Ketiga, volume aplikasi sebesar 40 mg per semprotan merupakan jumlah optimal yang memastikan kecukupan serbuk sari tanpa pemborosan (Prasetyo dan Susanto, 2012).

Metode aspol konvensional yang masih banyak digunakan saat ini menghadapi berbagai keterbatasan operasional yang krusial. (Broussard, Coates dan Martinsen, 2023) mengidentifikasi tiga

kendala utama aspol manual: (1) ketidakkonsistensian volume dan tekanan semprotan yang bergantung sepenuhnya pada kemampuan fisik operator; (2) tingginya risiko kecelakaan kerja akibat penggunaan metode tiupan manual menggunakan mulut manusia; dan (3) besarnya variabilitas antara operator yang berbeda-beda sehingga standarisasi kualitas penyerbukan tidak dapat dijamin. Kondisi ini secara langsung memengaruhi konsistensi dan efektivitas aspol di lapangan. Pada penyerbukan buatan kelapa sawit, serbuk sari umumnya diaplikasikan dalam bentuk kering dengan bantuan media inert seperti *talcum powder* untuk mempermudah distribusi polen pada bunga betina reseptif. Beberapa studi pada kelapa sawit juga mengembangkan pendekatan penyerbukan berbantuan menggunakan aplikasi polen maupun zat pengatur tumbuh dalam suspensi cair, namun efektivitas masing-masing metode sangat bergantung pada jenis tanaman, viabilitas polen, kondisi lingkungan, dan teknik aplikasi yang digunakan (Ruiz-Alvarez *et al.*, 2021). Pencampuran serbuk sari dengan *talcum powder* sebagai media inert telah banyak digunakan dalam penyerbukan berbantuan kelapa sawit untuk membantu aplikasi polen pada bunga betina reseptif. Beberapa penelitian menggunakan campuran polen dan *talc* dengan rasio tertentu, seperti 0,3 g polen dan 2,7 g *talc*, atau rasio *talc:pollen*

9:1, sehingga penggunaan polen dapat lebih terukur dalam aplikasi penyerbukan buatan (Romero *et al.*, 2021; Ruiz-Alvarez *et al.*, 2021; Cayón Salinas *et al.*, 2022).

Pengembangan Sistem Otomasi Berbasis Mikrokontroler Arduino

Arduino Uno merupakan platform mikrokontroler open-source yang mudah diprogram, fleksibel, relatif murah, dan dapat diintegrasikan dengan berbagai sensor serta modul komunikasi. Karakteristik tersebut menjadikan Arduino relevan untuk pengembangan sistem otomasi pertanian presisi, termasuk sebagai sistem kontrol pada konsep Zirapusma-Spray berbasis IoT untuk perkebunan kelapa sawit (Navarro, Costa dan Pereira, 2020; Ruslan *et al.*, 2021).

Penggunaan mikrokontroler Arduino dalam sistem otomasi pertanian memungkinkan pengendalian parameter operasional secara terprogram, seperti waktu kerja, frekuensi, dan respons sensor. Pada penyerbukan buatan kelapa sawit, penggunaan alat bantu seperti sprayer telah dilaporkan dalam aplikasi polen maupun bahan penyerbukan lainnya (Tahir, 2009; Rendón *et al.*, 2022)

Pengendalian tekanan semprot menjadi aspek penting dalam desain Zirapusma-Spray karena tekanan aplikasi dapat memengaruhi aktivitas polen. Liu *et al.* (2023) menunjukkan bahwa pada *liquid spray pollination* tanaman pir, aktivitas polen menurun dari 40,7% menjadi 29,02%

ketika tekanan semprot meningkat dari 0,3 MPa menjadi 2,5 MPa. Meskipun penelitian tersebut dilakukan pada tanaman pir, temuan ini dapat digunakan sebagai dasar konseptual bahwa tekanan semprot pada sistem penyerbukan otomatis kelapa sawit perlu dikendalikan agar distribusi serbuk sari lebih konsisten dan viabilitas polen tetap terjaga (Liu *et al.*, 2023). Tekanan yang terlalu tinggi menyebabkan serbuk sari tersebar jauh dari area target, sedangkan tekanan terlalu rendah mengakibatkan distribusi yang tidak merata dan serbuk sari menggumpal di sekitar nozzle. Temuan ini menjadi acuan kritis dalam desain sistem kontrol tekanan Zirapusma-Spray.

Pada kelapa sawit, aplikasi penyerbukan berbantuan umumnya dilakukan ketika bunga betina berada pada fase reseptif atau anthesis. Karena keberhasilan penyerbukan sangat bergantung pada ketepatan waktu aplikasi dan konsistensi perlakuan, penggunaan sistem otomasi berbasis Arduino dan IoT pada Zirapusma-Spray berpotensi membantu penjadwalan dan pengendalian parameter penyerbukan secara lebih terukur. Namun, frekuensi optimal penyemprotan dan durasi aplikasi pada kelapa sawit masih perlu diuji secara spesifik melalui pengujian prototipe.

Implementasi IoT dalam Pertanian Presisi

Internet of Things (IoT) telah menjadi salah satu teknologi utama dalam pertanian presisi karena mampu menghubungkan perangkat fisik, sensor, jaringan komunikasi, dan sistem digital untuk mendukung pemantauan kondisi lingkungan secara *real-time*. Dalam konteks perkebunan kelapa sawit, pemantauan parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, curah hujan, dan intensitas cahaya menjadi penting karena faktor-faktor tersebut dapat memengaruhi aktivitas serangga penyerbuk, kelimpahan *Elaeidobius kamerunicus*, serta efisiensi penyerbukan alami di lapangan (Rashid *et al.*, 2021; Shashikant *et al.*, 2021; Mowla *et al.*, 2023; Krishnan dan Pimid, 2024; Kalaivani, Kamireddy dan Govindakumar, 2025).

Implementasi IoT dalam sistem aspol memberikan beberapa keunggulan dibandingkan sistem konvensional. Pertama, kemampuan pemantauan *real-time* memungkinkan operator untuk mengetahui status operasional alat dan kondisi tanaman secara akurat dari jarak jauh. Kedua, data historis yang terkumpul melalui platform IoT dapat dianalisis untuk mengembangkan model prediktif guna mengoptimalkan jadwal dan intensitas aspol. Ketiga, sistem notifikasi otomatis dapat memberikan peringatan dini ketika kondisi penyerbukan

tidak optimal atau persediaan serbuk sari hampir habis.

Penggunaan modul komunikasi nirkabel seperti WiFi atau GSM pada platform Arduino memungkinkan integrasi langsung dengan infrastruktur IoT. Data yang dikumpulkan dapat dikirimkan ke platform cloud dan diakses melalui aplikasi berbasis smartphone atau web oleh operator dan manajer kebun. Pendekatan ini sejalan dengan tren pertanian presisi (precision agriculture) yang semakin banyak diterapkan di perkebunan-perkebunan modern di Indonesia.

Konsep Desain dan Parameter Operasional Zirapusma-Spray

Berdasarkan sintesis komprehensif dari literatur yang dikaji, Zirapusma-Spray dirancang sebagai sistem aspol otomatis yang mengintegrasikan teknologi Arduino Uno dengan platform IoT. Sistem ini terdiri dari tujuh komponen utama yang saling terintegrasi: (1) mikrokontroler Arduino Uno sebagai unit pemrosesan pusat yang mengendalikan seluruh operasi sistem; (2) motor DC mini sebagai penggerak mekanisme pompa semprot; (3) nozzle spray yang telah dikalibrasi untuk menghasilkan distribusi serbuk sari optimal pada tekanan 0,7 Psi; (4) LCD 2x16 sebagai antarmuka pengguna lokal; (5) push button untuk kontrol manual dan konfigurasi parameter; (6) modul komunikasi WiFi/GSM untuk

konektivitas IoT; dan (7) baterai portabel sebagai sumber daya lapangan.

Parameter operasional Zirapusma-Spray ditetapkan berdasarkan temuan literatur: tekanan semprot 0,7 Psi, volume serbuk sari 40 mg per semprotan, frekuensi penyerbukan 2–3 kali sehari selama 3–5 hari dan rasio campuran serbuk sari:Talc Powder sebesar 1:3. Debit semprotan dihitung menggunakan rumus kalibrasi $Q = M/t$, di mana Q adalah debit semprotan (mg/detik), M adalah massa serbuk sari yang dikeluarkan (mg), dan t adalah waktu penyemprotan (detik). Kalibrasi dilakukan secara berkala untuk memastikan konsistensi volume semprotan sesuai standar.

Sistem IoT pada Zirapusma-Spray memungkinkan pemantauan real-time terhadap seluruh parameter operasional melalui antarmuka digital. Data yang dipantau meliputi jumlah semprotan yang telah dilakukan, total serbuk sari yang telah diaplikasikan, jadwal penyerbukan berikutnya, serta status baterai dan kondisi alat. Fitur logging data memungkinkan analisis tren dan evaluasi efektivitas aspol secara berkala untuk optimasi berkelanjutan.

Proyeksi Peningkatan Produktivitas dan Manfaat Ekonomi

Berdasarkan kajian literatur yang komprehensif, implementasi Zirapusma-Spray diproyeksikan dapat meningkatkan *fruit set* kelapa sawit secara signifikan. Kombinasi antara konsistensi distribusi

serbuk sari, ketepatan waktu penyerbukan, dan optimasi parameter operasional yang dimungkinkan oleh sistem otomatis berpotensi meningkatkan *fruit set* hingga di atas 80% (Prasetyo dan Susanto, 2012) melampaui standar industri minimal 75%. Peningkatan ini berdampak langsung pada kenaikan produksi TBS dan rendemen minyak sawit.

Dari perspektif ekonomi, (Ruiz-Alvarez *et al.*, 2021) melaporkan bahwa sistem penyerbukan berbantuan yang terstandarisasi mampu meningkatkan produksi TBS hingga 12,4% per tahun. Selain itu, efisiensi penggunaan serbuk sari melalui sistem otomatis yang terprogram dapat mengurangi pemborosan dibandingkan metode manual, sehingga biaya material per siklus penyerbukan dapat ditekan. Pengurangan kebutuhan tenaga kerja manual untuk aspol juga berkontribusi pada efisiensi biaya operasional perkebunan secara keseluruhan.

Aspek keselamatan kerja merupakan keunggulan lain yang signifikan dari Zirapusma-Spray. Dengan mengeliminasi metode tiupan serbuk sari manual menggunakan mulut manusia yang berisiko tinggi terhadap kesehatan pernapasan operator, sistem ini secara langsung mengurangi potensi kecelakaan dan penyakit akibat kerja (Broussard, Coates dan Martinsen, 2023). Desain ergonomis dengan

handle yang nyaman dan sistem baterai portabel memungkinkan operator melakukan kegiatan aspol dengan lebih aman dan efisien, bahkan dalam skala areal yang luas. Keunggulan-keunggulan ini menjadikan Zirapusma-Spray sebagai inovasi yang berpotensi besar mendukung keberlanjutan industri kelapa sawit Indonesia.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur sistematis, penelitian ini menunjukkan bahwa konsep perancangan Zirapusma-Spray sebagai alat penyerbukan otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) dan mikrokontroler Arduino Uno layak dikembangkan sebagai inovasi *assisted pollination* pada perkebunan kelapa sawit. Integrasi Arduino Uno berperan sebagai sistem kendali otomatis, sedangkan IoT mendukung pemantauan dan pengendalian parameter penyerbukan secara *real-time*. Dengan konsep tersebut, Zirapusma-Spray diproyeksikan mampu meningkatkan konsistensi distribusi serbuk sari, mengurangi ketergantungan pada penyerbukan manual, meningkatkan efisiensi penyerbukan hingga 30%, serta mendukung perkebunan kelapa sawit yang lebih produktif dan berkelanjutan. Pengujian prototipe secara langsung di lapangan diperlukan sebagai tahap lanjutan untuk

memvalidasi efektivitas konsep perancangan ini pada kondisi agroklimat perkebunan kelapa sawit di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Asib, N. dan Musli, N. N. (2020) 'Effect Of Six Insecticides On Oil Palm Pollinating Weevil, *Elaeidobius kamerunicus* (Coleoptera: Curculionidae)', *Serangga*, 25(2).
- Broussard, M. A., Coates, M. dan Martinsen, P. (2023) 'Artificial Pollination Technologies: A Review', *Agronomy*, 13(5). doi: 10.3390/agronomy13051351.
- Cayón Salinas, D. G. *et al.* (2022) 'Application of naphthalene acetic acid dan gibberellic acid favours fruit induction dan development in oil palm hybrid (*Elaeis oleifera* x *Elaeis guineensis*)', *Experimental Agriculture*, 58. doi: 10.1017/S001447972200031X.
- Criollo-Escobar, H. dan Dominguez Chauza, J. J. (2018) 'Germinability dan pollen viability of four improved cultivars of palm oil under laboratory conditions', *Revista Facultad Nacional de Agronomia Medellin*, 71(1), pp. 8395–8405. doi: 10.15446/rfna.v71n1.69587.
- Ekaratne, S. N. R. dan Senathirajah, S. (1983) 'Viability dan Storage of Pollen of the Oil Palm, *Elaeis guineensis* Jacq.', *Annals of Botany*, 51(5), pp. 661–668.
- Fatihah L, N. A. *et al.* (2022) 'Effect Of Oil Palm Planting Materials, Rainfall, Number Of Male Inflorescence Dan Spikelet On The Population Abundance Of Oil Palm Pollinator, *Elaeidobius kamerunicus* Faust (Coleoptera: Curculionidae)', *Serangga*, 23(1), pp. 35–45.
- Gintoron, C. S. *et al.* (2023) 'Factors Affecting Pollination dan Pollinators in Oil Palm Plantations: A Review with an Emphasis on the *Elaeidobius kamerunicus* Weevil (Coleoptera: Curculionidae)', *Insects*, 14(5), pp. 1–21. doi: 10.3390/insects14050454.
- Kadri, K. *et al.* (2022) 'Effect of pollination time, the hour of daytime, pollen storage temperature dan duration on pollen viability, germinability, dan fruit set of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) cv "Deglet Nour"', *Saudi Journal of Biological Sciences*. The Author(s), 29(2), pp. 1085–1091. doi: 10.1016/j.sjbs.2021.09.062.
- Kalaivani, T. S., Kamireddy, T. dan Govindakumar, S. (2025) 'IoT-Enabled Soil dan Crop Monitoring System Using Low-Cost Smart Sensors for Precision Agriculture', *engineering proceedings*, 118, p. 77. doi: 10.3390/ecsa-12-26537.
- Kamaruddin, F. *et al.* (2019) 'IoT-based intelligent irrigation management dan monitoring system using arduino', *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics dan Control)*, 17(5), pp. 2378–2388. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v17i5.12818.
- Kartika, E., Duaja, M. D. dan Gusniwat, G. (2022) 'Production Of Oil Palm (*Elaeis Guineensis* Jack) Flower Bunches In Ultisol On Application Of Biofertilizers Dan In Organic Fertilizers', *Agric*, 34(2), pp. 155–170. doi: 10.24246/agric.2022.v34.i2.p155-170.
- Krishnan, K. T. dan Pimid, M. (2024) 'Understndaning The Effects of Climate Change on *Elaeidobius kamerunicus* (Coleoptera: Curculionidea), An Important Oil Palm Pollinator in Malaysia: Predicting Future Distribution For The Year 2050 Under Different Climate Pathways', *Malaysian Applied Biology*, 53(6), pp. 167–177. doi: 10.55230/mabjournal.v53i6.11.
- Liu, L. *et al.* (2023) 'Influence of Different Liquid Spray Pollination Parameters on Pollen Activity of Fruit Trees—Pear Liquid Spray Pollination as an

- Example', *Horticulturae*, 9(3). doi: 10.3390/horticulturae9030350.
- Lubis, F. I., Sudarjat, S. dan Dono, D. (2017) 'Populasi Serangga Penyerbuk Kelapa Sawit *Elaeidobius kamerunicus* Faust dan Pengaruhnya terhadap Nilai *Fruit set* pada Tanah Berliat, Berpasir dan Gambut di Kalimantan Tengah, Indonesia', *Agrikultura*, 28(1), pp. 39–46. doi: 10.24198/agrikultura.v28i1.13056.
- Maisarah dan Dian, R. (2023) 'Penggunaan Metode Life Cycle Assessment (LCA) Sebagai Pendukung Pengambilan Keputusan Dampak Lingkungan Pada Industri Kelapa Sawit', *Jurnal Ilmiah Betahpa*, 2(2), pp. 7–15.
- Maisarah, M. dan Dian, R. (2024) 'Metode Life Cycle Assessment (LCA) Dalam Penilaian Dampak Lingkungan Industri Kelapa Sawit Untuk Kelapa Sawit Berkelanjutan', *Tabela Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 2(1), pp. 15–23. doi: 10.56211/tabela.v2i1.452.
- Meléndez, M. R. dan Ponce, W. P. (2016) 'Pollination in the oil palms *Elaeis guineensis*, *E. oleifera* dan their hybrids (OxG), in tropical America', *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(1), pp. 102–110. doi: 10.1590/1983-40632016v4638196.
- Mohamad, S. A. *et al.* (2023) 'Impact Of *Elaeidobius Kamerunicus* (Faust) Introduction On Oil Palm Fruit Formation In Malaysia Dan Factors Affecting Its Pollination Efficiency: A Review', *Journal of Oil Palm Research*, 35(March), pp. 1–22.
- Morcillo, F. *et al.* (2013) 'Improving palm oil quality through identification dan mapping of the lipase gene causing oil deterioration', *Nature Communications*, 4, pp. 1–8. doi: 10.1038/ncomms3160.
- Mowla, M. N. *et al.* (2023) 'Internet of Things dan Wireless Sensor Networks for Smart Agriculture Applications: A Survey', *IEEE Access*. IEEE, 11(December), pp. 145813–145852. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3346299.
- Navarro, E., Costa, N. dan Pereira, A. (2020) 'A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming', *Sensors*, 20(6), pp. 38–40. doi: 10.1049/et.2012.0601.
- Obaideen, K. *et al.* (2022) 'An overview of smart irrigation systems using IoT', *Energy Nexus*. Elsevier Ltd, 7(January), p. 100124. doi: 10.1016/j.nexus.2022.100124.
- Potts, S. G. *et al.* (2010) 'Global pollinator declines: Trends, impacts dan drivers', *Trends in Ecology dan Evolution*. Elsevier Ltd, 25(6), pp. 345–353. doi: 10.1016/j.tree.2010.01.007.
- Prasetyo, A. E., Purba, W. O. dan Susanto, A. (2014) '*Elaeidobius kamerunicus*: Application of hatch dan carry technique for increasing oil palm *fruit set*', *Journal of Oil Palm Research*, 26(3), pp. 195–202.
- Prasetyo, A. E. dan Susanto, A. (2012) *Meningkatkan Fruit set Kelapa Sawit dengan Teknik Hatch dan Carry Elaeidobius kamerunicus*. Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Rajak, P. *et al.* (2023) 'Internet of Things dan smart sensors in agriculture: Scopes dan challenges', *Journal of Agriculture dan Food Research*. Elsevier B.V., 14(June), p. 100776. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100776.
- Rashid, M. *et al.* (2021) 'A Comprehensive Review of Crop Yield Prediction Using Machine Learning Approaches with Special Emphasis on Palm Oil Yield Prediction', *IEEE Access*, 9, pp. 63406–63439. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075159.
- Rendón, D. A. H. *et al.* (2022) 'Assessing the labor productivity of two methods of artificial pollination in oil palm crops from Colombia', *OCL - Oilseeds dan fats, Crops dan Lipids*, 29(12).
- Romero, H. M. *et al.* (2021) 'High-Oleic

- Palm Oil (HOPO) Production from Parthenocarpic', *Agronomy*, 11(290), pp. 1–18.
- Ruiz-Alvarez, E. *et al.* (2021) 'Complementing assisted pollination with artificial pollination in oil palm crops planted with interspecific hybrids O × G (*Elaeis guineensis* × *Elaeis oleifera*): Is it profitable?', *OCL - Oilseeds dan fats, Crops dan Lipids*, 28. doi: 10.1051/ocl/2021014.
- Ruslan, A. A. *et al.* (2021) 'IoT Real-Time Soil Monitoring Based on LoRa for Palm Oil Plantation', *Journal of Physics: Conference Series*, 1874(1), pp. 215–220. doi: 10.1088/1742-6596/1874/1/012047.
- Sekar, A. R., Kumar, D. dan Prabhu, D. (2022) 'Novel Pollination Drone for Agricultural Assistance', *International Journal for Research in Applied Science dan Engineering Technology*, 10(6), pp. 3408–3420. doi: 10.22214/ijraset.2022.44596.
- Shashikant, V. *et al.* (2021) 'Challenges of iot/5g advancement in the oil palm upstream', *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 34(special issue 1), pp. 190–198. doi: 10.37077/25200860.2021.34.SP1.19.
- Singh, G. dan Rana, A. (2025) 'Honeybees dan colony collapse disorder: understaning key drivers dan economic implications', *Proceedings of the Indian National Science Academy*. Indian National Science Academy, 91(3), pp. 750–766. doi: 10.1007/s43538-025-00399-x.
- Syahputra, W. *et al.* (2018) 'The Influence of Several Insecticides on *Elaeidobius kamerunicus* Faust (Coleoptera: Curculionidae) Population in Kaliaanta Oil Palm Plantation Riau Wahyu', *Jurnal Agroteknologi FP USU*, 6(3), pp. 306–312.
- Tahir, M. (2009) 'Uji Polinator Elektrik Dan Polen Ekstraktor Untuk Polinasi Buatan Kelapa Sawit', *Prosiding Seminar Nasional Sumber Daya Genetik dan Pemuliaan Tanaman*, 1(1), pp. 663–669.
- Vanbergen, A. J. *et al.* (2013) 'Threats to an ecosystem service: Pressures on pollinators', *Frontiers in Ecology dan the Environment*, 11(5), pp. 251–259. doi: 10.1890/120126.
- Wirdana, M. A. dan Banowati, G. (2022) 'Kajian Pembentukan Fruit set Kelapa Sawit Pada Lahan Gambut dan Pasiran', *Jurnal Pengelolaan Perkebunan (JPP)*, 3(2), pp. 54–61. doi: 10.54387/jpp.v3i2.20.
- Yousefi, M. *et al.* (2020) 'Introduction of current pollination techniques dan factors affecting pollination effectiveness by *Elaeidobius kamerunicus* in oil palm plantations on regional dan global scale: A review', *South African Journal of Botany*, 132, pp. 171–179. doi: 10.1016/j.sajb.2020.04.017.