

Metode Termografi Inframerah untuk Deteksi Dini *Pepper yellow leaf curl virus* pada Tanaman Cabai

Infrared Thermography for Early Detection of *Pepper yellow leaf curl virus* on Chili Plants

Triyani Dumaria, Sri Hendrastuti Hidayat*, Purnama Hidayat
Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680

ABSTRAK

Pengamatan hama dan penyakit tanaman umumnya dilakukan dengan mencari gejala visual untuk setiap sasaran tertentu. Teknologi pertanian 4.0 mulai digunakan untuk pengembangan metode deteksi penyakit tanaman. Dilaporkan bahwa terdapat perbedaan warna dan suhu antara tanaman sakit dengan tanaman sehat yang dapat direkam oleh kamera termal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi kamera termal FLIR One Pro- IOS untuk merekam perbedaan warna dan suhu antara tanaman cabai terinfeksi virus dan tanaman sehat. Tanaman cabai di rumah kaca yang diinokulasi *Pepper yellow leaf curl virus* (PYLCV) mengalami kenaikan suhu pada 3 hari setelah inokulasi (HSI) (28.62 °C) dibandingkan dengan tanaman yang tidak diinokulasi PYLCV (27.32 °C). Perekaman citra digital sampel daun tanaman cabai dari lapangan menunjukkan suhu yang lebih tinggi pada tanaman yang terinfeksi beberapa jenis virus (*Chilli veinal mottle virus*, *Pepper mottle virus* dan PYLCV) dibandingkan yang terinfeksi virus secara tunggal. Rata-rata suhu terendah dan tertinggi tercatat pada sampel tanaman yang terinfeksi PepMV (17.74 °C) dan terinfeksi campuran oleh PYLCV dan ChiVMV (25.68 °C). Citra digital tanaman yang terinfeksi virus cenderung menunjukkan dominasi warna kuning terang, sedangkan tanaman bebas virus menunjukkan dominasi warna ungu gelap. Analisis lebih lanjut mengonfirmasi bilangan digital yang lebih tinggi untuk citra tanaman sakit dibandingkan dengan tanaman sehat. Metode termografi berpotensi menjadi metode deteksi dini karena dapat mendeteksi infeksi virus sebelum gejala visual muncul.

Kata kunci: bilangan digital, citra digital, gejala visual, kamera FLIR One Pro-IOS, kamera termal

ABSTRACT

Observations of plant pests and diseases are generally carried out by looking for visual symptoms for each disease target. Agricultural technology 4.0 began to be used for the development of plant disease detection methods. It was reported that there were differences in color and temperature between diseased and healthy plants which could be recorded by a thermal camera. This study aimed to determine the potential of the FLIR One Pro-IOS thermal camera to record differences in color and temperature between viral-infected and healthy chili plants. Chili plants in the greenhouse that were inoculated with *Pepper yellow leaf curl virus* (PYLCV) experienced an increase in temperature 3 days after inoculation (28.62 °C) compared to plants that were not inoculated with PYLCV (27.32 °C). Digital image recording of chili leaf samples from the field showed that plants infected by multiple viruses (*Chilli veinal mottle virus*, *Pepper mottle virus* and PYLCV) has higher temperature than those infected with a single virus. The lowest and highest mean temperatures were recorded in plant samples infected with PepMV (17.74 °C) and mixed infected by PYLCV and ChiVMV (25.68 °C). Digital images of virus-infected plants tend to

*Alamat penulis korespondensi: Departemen Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, IPB University.
Jalan Kamper, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680.
Tel: 0251-8629364, Faks: 0251-8629362, Surel: srihendrastuti@apps.ipb.ac.id

show a predominance of bright yellow, while virus-free plants showed a predominance of dark purple. Further analysis confirmed higher digital numbers for diseased plant images than healthy plants. The thermography method has the potential to be an early detection method because it can detect viral infection before visual symptoms appear.

Keywords: digital image, digital number, FLIR One Pro-IOS camera, thermal camera, visual symptoms

PENDAHULUAN

Pengendalian hama terpadu (PHT) merupakan suatu konsep pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) dengan pendekatan ekologi yang bersifat multidisiplin untuk mengelola populasi hama dan penyakit dengan memanfaatkan beragam taktik pengendalian yang kompatibel dalam suatu kesatuan koordinasi pengelolaan. Terdapat empat prinsip utama dalam PHT, yaitu budi daya tanaman sehat, pemanfaatan musuh alami, pengamatan dan pemantauan rutin, dan petani sebagai ahli PHT (Mulyasa *et al.* 2020). Pengamatan dan pemantauan perkembangan populasi OPT merupakan bagian terpenting untuk mencegah penyebaran yang lebih luas dari OPT pada suatu wilayah. Selain oleh petani atau praktisi pertanian, kegiatan pemantauan dilakukan pula oleh pengamat lapangan atau petugas pengendali OPT (POPT). Kegiatan pengamatan di lapangan secara langsung menjadi kendala karena semakin terbatasnya petugas POPT jika dibandingkan dengan luasnya wilayah pengamatan, sehingga memiliki risiko yang tinggi dalam menjamin kecepatan, kelengkapan dan keakuratan data pengamatan. Metode pengamatan berbagai jenis OPT perlu ditinjau kembali sesuai dengan perkembangan kemajuan teknologi yang mutakhir.

Teknologi pertanian 4.0 mulai banyak digunakan untuk pengembangan metode deteksi penyakit tanaman. Sebagai contoh, kamera termal yang didasarkan pada pengukuran suhu tanaman mulai banyak diuji coba. Dilaporkan bahwa terdapat perbedaan warna dan suhu antara tanaman sakit dengan tanaman sehat yang dapat direkam oleh kamera termal. Zhu *et al.* (2018) melakukan penelitian menggunakan metode termografi

dengan target uji *Cucumber mosaic virus* (CMV) pada tanaman tomat dan *Puccinia triticina* pada gandum. Metode termografi tersebut dapat memvisualisasikan gejala lebih awal dibandingkan pengamatan gejala secara kasat mata, yaitu 5 dan 7 hari setelah inokulasi (HSI) berturut-turut pada tanaman tomat dan gandum. Daun tomat pada tanaman kontrol sehat memperlihatkan warna biru yang menandakan bahwa daun tanaman berada pada suhu rendah (23.2 °C); sedangkan daun tanaman yang diinokulasi CMV memperlihatkan warna kuning-oranye dengan suhu rata-rata 24.1 °C.

Penelitian dilakukan untuk mengembangkan metode termografi sebagai metode deteksi dini infeksi virus, dengan model yang digunakan ialah *Pepper yellow leaf curl virus* (PYLCV) pada tanaman cabai. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dan bahan pertimbangan mengenai metode termografi sebagai alternatif metode deteksi dini untuk infeksi virus.

BAHAN DAN METODE

Kegiatan penelitian terdiri atas 3 tahap, yaitu (1) perekaman dan analisis citra gejala dari tanaman uji, (2) perekaman dan analisis citra gejala dari tanaman di lapangan, dan (3) deteksi virus dari tanaman sampel yang digunakan pada tahap 1 dan 2.

Perekaman Citra Gejala dari Tanaman Uji
Penyiapan tanaman uji dan inokulasi virus. Benih tanaman uji yang digunakan pada penelitian, yaitu cabai (*Capsicum frutescens*) varietas Pelita 8. Benih tanaman cabai disemai pada baki semai berukuran 5 × 10 cm dengan medium tanam steril yang terdiri atas campuran tanah dan kompos (2:1 b/b).

Satu lubang baki semai diisi dengan 2 benih cabai. Pada umur 3 minggu setelah semai, bibit tanaman cabai dipindahkan ke dalam pot plastik berukuran 30 × 30 cm yang berisi medium tanam steril campuran tanah dan kompos (2:1 b/b). Setelah pindah tanam, pot plastik dimasukkan ke dalam kurungan kasa berbentuk kubus (1.5 × 1.5 × 1.5 m) yang kedap serangga. Bahan penutup bagian depan kurungan menggunakan plastik kaca tipis, sedangkan di bagian sisi lainnya menggunakan kain kasa.

Isolat PYLCV dan serangga vektor *Bemisia tabaci* yang digunakan merupakan koleksi Laboratorium Virologi Tumbuhan, IPB. Inokulasi PYLCV pada tanaman uji mengikuti metode yang diuraikan oleh Selangga *et al.* (2019), yaitu menggunakan metode penularan individual. Tanaman uji diinokulasi pada umur 20 hari setelah pindah tanam. Serangga imago diberi periode makan akuisisi pada tanaman sakit selama 24 jam, setelah itu serangga dipindahkan ke tanaman uji sebanyak 10 ekor serangga per tanaman untuk diberikan periode makan inokulasi selama 48 jam. Setelah melalui periode makan inokulasi serangga dimusnahkan. Sebagai perlakuan kontrol (tanpa inokulasi virus), serangga vektor yang dipindahkan ke tanaman cabai uji yang sehat ialah serangga yang bebas virus.

Percobaan ini disusun menggunakan rancangan acak lengkap dengan 2 perlakuan, yaitu perlakuan tanpa inokulasi (V0) dan inokulasi (V1) PYLCV. Masing-masing perlakuan diulang 3 kali, masing-masing ulangan terdiri atas 4 unit tanaman. Pada akhir percobaan, dilakukan deteksi virus untuk mengonfirmasi infeksi PYLCV pada tanaman uji.

Perekaman dan analisis citra tanaman.

Alat yang digunakan untuk perekaman citra tanaman ialah kamera termal FLIR One Pro-IOS (*Thermal imaging camera for smartphone*) yang dihubungkan dengan ponsel Iphone seri 6S Plus. Perekaman citra tanaman dilakukan setiap hari mulai pukul 06.00 hingga 09.00 WIB, sejak 3 hari sebelum inokulasi virus sampai muncul gejala (visual) infeksi virus. Gejala yang ditimbulkan pada

tanaman yang terinfeksi PYLCV ialah mosaik kuning, daun keriting, mosaik hijau, kerdil, dan daun menggulung ke atas atau ke bawah (Selangga *et al.* 2021).

Selama perekaman citra, tanaman uji diletakkan dalam sungkup dengan bahan plastik mika untuk meminimalkan bias dari faktor lingkungan. Dalam kurungan tersebut dipasang *thermo hygrometer* dan dilakukan pencatatan suhu dan kelembapan sebelum dan sesudah pengambilan citra termal. Posisi lensa kamera termal saat pengambilan citra diletakkan 30±5 cm tepat di atas tanaman (Zhu *et al.* 2018).

Data hasil perekaman citra diolah menggunakan *Microsoft Excel 2013*. Perbedaan nilai rata-rata suhu antar perlakuan dianalisis menggunakan *independent-sample t test* dengan aplikasi SPSS.

Perekaman Citra Gejala dari Tanaman di Lapangan

Survei dan pengambilan sampel tanaman. Objek penelitian adalah tanaman cabai di lahan petani di Desa Maleber dan Desa Pasir Sarongge, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat. Penelitian menggunakan metode observasi langsung di lapangan yang dilakukan secara *purposive sampling* pada tanaman yang menunjukkan gejala terinfeksi virus, yaitu mosaik kuning, daun keriting, mosaik hijau, kerdil, daun menggulung ke atas dan atau ke bawah. Pada masing-masing lokasi pengamatan ditentukan dua lahan pertanaman cabai, selanjutnya pada masing-masing lahan ditentukan 3 petak pengamatan dengan luas petak masing-masing 20 m². Pengamatan dan perekaman citra tanaman dilakukan satu kali dengan pertimbangan bahwa virus menginfeksi secara sistemik.

Perekaman dan analisis citra tanaman. Alat yang digunakan untuk perekaman citra tanaman ialah kamera termal FLIR One Pro-IOS seperti yang digunakan pada perekaman citra tanaman uji. Perekaman citra tanaman dilakukan mulai pukul 06.00 hingga 09.00 WIB dan dilakukan pencatatan suhu dan kelembapan sebelum dan sesudah pengambilan citra termal. Setelah perekaman citra tanaman,

daun tanaman bergejala dikumpulkan dan dibawa ke laboratorium untuk dilakukan deteksi virus.

Data hasil perekaman citra diolah menggunakan *Microsoft Excel* 2013. Perbedaan nilai suhu antarperlakuan dianalisis menggunakan uji Kruskal Wallis dengan program *xlstat* melalui uji lanjut Dunn pada taraf 5%.

Identifikasi Virus dari Sampel Tanaman

Metode *polymerase chain reaction* (PCR). Infeksi PYLCV pada tanaman cabai uji di rumah kaca dan tanaman cabai di lapangan dikonfirmasi menggunakan metode PCR. Tahapan deteksi dan identifikasi PYLCV terdiri atas ekstraksi DNA, amplifikasi DNA, dan visualisasi DNA. Ekstraksi DNA dari sampel daun tanaman dilakukan mengikuti Doyle dan Doyle (1987). DNA hasil ekstraksi digunakan sebagai cetakan untuk mengamplifikasi DNA *Begomovirus* mengikuti metode Rojas *et al.* (1993), dengan sepasang primer universal *Begomovirus* (SPG1 [dan SPG2) yang mengamplifikasi bagian TrAP dan Rep dengan ukuran fragmen DNA yang diharapkan \approx 912 pb. Sikuen nukleotida primer SPG1 ialah 5'-CCCCGTGCGWRAATCCAT-3', sedangkan SPG2 yaitu 5'-ATCCVAAYWTY CAGGGAGCT-3' (Li *et al.* 2004).

Fragmen DNA hasil amplifikasi digunakan untuk perunutatan sekuen DNA. Analisis sekuen dibandingkan dengan sekuen nukleotida virus asal negara lain yang terdaftar di GenBank menggunakan program *basic local alignment search tool* (BLAST) pada situs *National Center for Biotechnology Information* (www.ncbi.nlm.nih.gov).

Metode *double antibody sandwich enzyme-linked immunosorbent assay* (DAS-ELISA). Tanaman cabai di lapangan dapat terinfeksi oleh berbagai jenis virus. Oleh karena itu, selain deteksi PYLCV juga dilakukan deteksi virus lainnya pada sampel tanaman cabai di lapangan. Metode DAS-ELISA dilakukan mengikuti protokol kit DSMZ Germany (Clark dan Adams 1977) menggunakan antiserum spesifik terhadap virus utama cabai, yaitu *Chilli veinal mottle virus* (ChiVMV), *Pepper mottle virus*

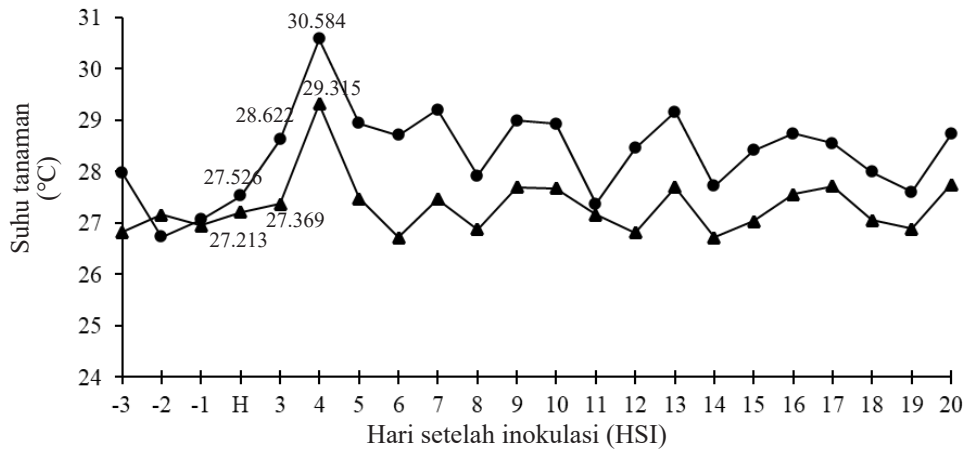
(PepMV), *Tobacco mosaic virus* (TMV), dan *Cucumber mosaic virus* (CMV).

HASIL

Perubahan Suhu dan Citra Digital Tanaman Terinfeksi PYLCV

Gejala awal infeksi PYLCV mulai terlihat secara visual pada rentang periode inkubasi 5 sampai 18 HSI. Sebelum gejala muncul, tercatat adanya perbedaan suhu antara tanaman yang tidak diinokulasi PYLCV (V0) dengan tanaman yang diinokulasi PYLCV (V1). Pencatatan suhu daun menunjukkan bahwa pada 3 HSI, rata-rata suhu daun pada tanaman V0 dan tanaman V1 berada antara 26 °C hingga 28 °C. Berbeda dengan perlakuan V0 rata-rata suhu pada perlakuan V1 mengalami kenaikan pada 3 HSI, yaitu mencapai 28.622 °C (Gambar 1). Nilai rata-rata suhu pada tanaman yang tidak diinokulasi PYLCV lebih rendah (27.32 °C) daripada tanaman yang diinokulasi PYLCV (28.36 °C) (Tabel 1). Berdasarkan analisis menggunakan *Levene's test* ($\alpha > 0.05$) dan *t-test* ($\alpha < 0.05$) terbukti bahwa rata-rata suhu antarperlakuan pada tanaman di rumah kaca ialah homogen dan berbeda nyata (Tabel 2).

Perubahan suhu daun pada tanaman juga tervisualisasi melalui perubahan warna citra digital daun. Semakin terang area pada citra daun (ungu gelap ke putih) maka semakin tinggi suhu di area daun tersebut dalam merefleksikan citra digital. Sebaliknya, semakin gelap area pada citra daun maka semakin rendah suhu di area daun tersebut (Gambar 2). Citra digital daun tanaman perlakuan V1 pada 3 HSI tampak lebih ungu terang dibandingkan dengan tanaman perlakuan V0. Pada 5 HSI saat V1 mulai menunjukkan gejala awal, visualisasi oleh citra digital juga berwarna ungu lebih terang dibandingkan dengan V0. Hal ini menunjukkan bahwa pengamatan citra digital mampu mendeteksi infeksi virus lebih dini, yaitu ketika gejala belum tampak secara visual. Gejala awal infeksi PYLCV yang terlihat ialah gejala mosaik hijau di bagian atas daun; selanjutnya daun yang tumbuh berikutnya tampak keriting, menggulung



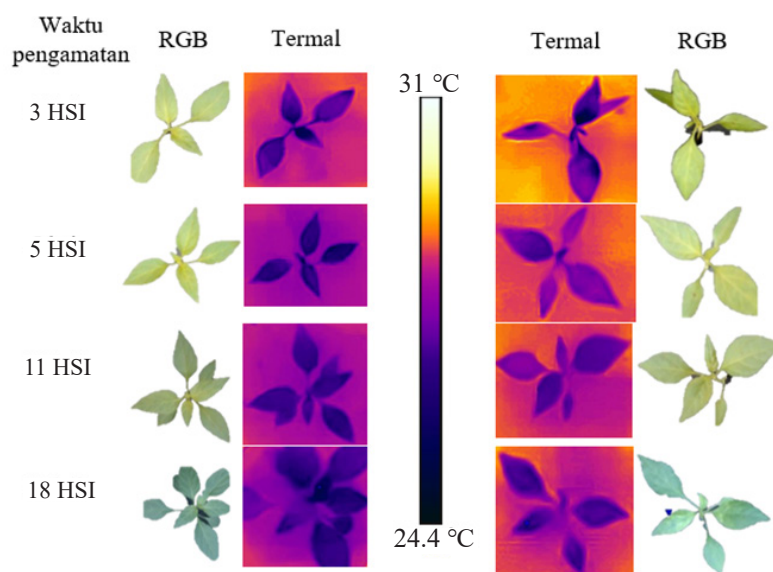
Gambar 1 Dinamika perubahan suhu pada tanaman yang tidak inokulasi (—▲—, V0) dan tanaman yang diinokulasi PYLCV (—●—, V1) di rumah kaca berdasarkan pengamatan sejak 3 hari sebelum inokulasi sampai dengan 20 hari setelah inokulasi.

Tabel 1 Perbedaan nilai rata-rata suhu pada tanaman yang tidak inokulasi PYLCV (V0) dan tanaman yang diinokulasi PYLCV (V1) di rumah kaca

Perlakuan	N	Rata-rata suhu (°C)	Standar deviasi	Rata-rata standar error
V0	22	27.32	0.57	0.12
V1	22	28.36	0.86	0.18

Tabel 2 Analisis rata-rata suhu antar perlakuan menggunakan *independent-sample t test* dengan aplikasi SPSS

Equal variances	Levene's test for equality of variances		t-test for Equality of means				
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean difference	Std. error difference
Assumed	3.645	0.06	-4.73	42	0.000	-1.04	0.22
Not assumed			-4.73	36.52	0.000	-1.04	0.22



Gambar 2 Citra RGB (*red-green-blue*) dan termal digital pada sampel tanaman tidak inokulasi (kiri) dan tanaman yang diinokulasi PYLCV (kanan) di rumah kaca.

ke bawah dan tanaman kerdil. Deteksi PCR yang dilanjutkan dengan identifikasi berdasarkan sekuen nukleotida mengonfirmasi bahwa gejala tersebut disebabkan oleh PYLCV (data tidak ditampilkan).

Hasil analisis bilangan digital juga mengonfirmasi bahwa rata-rata bilangan digital pada tanaman yang tidak diinokulasi PYLCV (V0) lebih rendah dibandingkan dengan tanaman yang diinokulasi (V1) (Gambar 3). Refleksi cahaya merah, hijau, dan biru pada tanaman yang terinfeksi oleh virus semakin tinggi seiring dengan bertambah luasnya gejala yang muncul pada daun. Refleksi cahaya tersebut menghasilkan bilangan digital yang lebih tinggi.

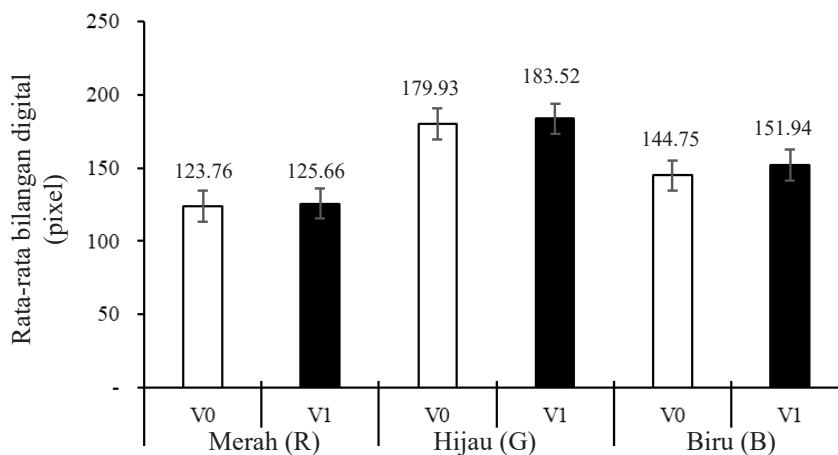
Perbedaan Suhu dan Citra Digital Tanaman Terinfeksi Virus yang Berbeda

Sebanyak total 30 sampel daun tanaman dikumpulkan dari Desa Maleber dan Pasir Sarongge. Gejala infeksi virus yang dominan pada sampel daun tersebut mencakup mosaik kuning, belang, daun menggulung ke atas dan/atau ke bawah. Berdasarkan hasil deteksi dengan metode PCR dan DAS-ELIS menunjukkan adanya infeksi PYLCV, ChiVMV dan PepMV secara tunggal; infeksi campuran 2 virus, yaitu ChiVMV dan PepMV, serta PYLCV dan ChiVMV; infeksi campuran 3 virus, yaitu PYLCV, ChiVMV dan PepMV. Selain itu, terdapat 6 sampel yang tidak memberikan reaksi pada deteksi PCR maupun

DAS-ELISA (Tabel 3). Hal tersebut dapat terjadi karena target deteksi pada penelitian ini hanya 5 virus, sementara terdapat berbagai jenis virus lain yang dilaporkan menginfeksi tanaman cabai di lapangan, di antaranya *Tobacco etch virus*, *Tobacco rattle virus*, *Potato virus A*, *Potato virus Y*, *Potato virus M*, dan *Tomato ring spot virus* (Sutrawati *et al.* 2012; Annisaa *et al.* 2021).

Kisaran suhu sampel daun dari lapangan ialah 17.74–25.68 °C (Tabel 3). Rata-rata suhu tertinggi tercatat pada sampel tanaman yang terinfeksi campuran oleh PYLCV dan ChiVMV, akan tetapi tidak berbeda nyata dengan sampel tanaman yang terinfeksi campuran oleh PYLCV, ChiVMV dan PepMV, serta sampel tanaman yang tidak teridentifikasi virusnya ($nd_1 - nd_6$). Rata-rata suhu terendah tercatat pada sampel tanaman yang terinfeksi oleh PepMV dan berbeda nyata dengan sampel tanaman lainnya. Bila diperhatikan secara khusus untuk infeksi PYLCV, sampel tanaman yang terinfeksi tunggal oleh PYLCV memiliki suhu yang berbeda secara nyata lebih rendah dibandingkan dengan sampel tanaman yang terinfeksi campuran PYLCV dan ChiVMV, serta PYLCV, ChiVMV dan PepMV.

Perbedaan citra digital pada setiap sampel tanaman di lapangan ditunjukkan dari hasil perekaman menggunakan kamera termal (Gambar 4). Suhu terendah pada sampel tanaman yang terinfeksi PepMV (17.74 °C) memiliki warna citra digital tampak lebih ungu



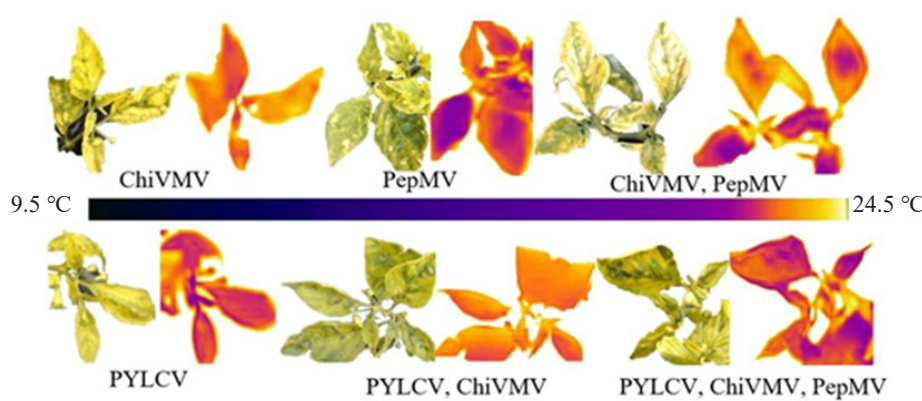
Gambar 3 Rata-rata bilangan digital saluran merah (R), hijau (G), dan biru (B) pada citra sampel tanaman yang tidak inokulasi (V0) dan tanaman yang diinokulasi PYLCV (V1) di rumah kaca.

Tabel 3 Jenis virus dan gejala visualnya serta suhu sampel tanaman cabai dari Desa Maleber dan Desa Pasir Sarongge, Kabupaten Cianjur, Jawa Barat

Jenis virus ¹	Deskripsi gejala	Rata-rata (°C) ²
PYLCV	mosaik kuning, daun menggulung ke atas	22.59 cd
ChiVMV	mosaik kuning	22.42 bc
PepMV	mosaik kuning	17.74 a
ChiVMV dan PepMV	mosaik kuning, belang	21.60 b
PYLCV dan ChiVMV	mosaik hijau, daun menggulung ke bawah	25.68 f
PYLCV, ChiVMV dan PepMV	mosaik kuning, daun menggulung ke bawah	24.75 ef
nd ₁	mosaik hijau, daun menggulung ke bawah	24.41 def
nd ₂	mosaik kuning, daun menggulung ke bawah	22.54 bcd
nd ₃	mosaik hijau	25.16 ef
nd ₄	mosaik kuning, daun menggulung ke atas	24.66 ef
nd ₅	mosaik kuning	23.53 cde
nd ₆	mosaik kuning	24.49 def

¹PYLCV, *Pepper yellow leaf curl virus*; ChiVMV, *Chili veinal mottle virus*; PepMV, *Pepper mottle virus*; nd₁ – nd₆, virus tidak teridentifikasi

²Angka pada kolom yang sama diikuti huruf yang sama berarti tidak berbeda nyata berdasarkan hasil uji lanjut Dunn pada α 5%.



Gambar 4 Citra RGB (*red-green-blue*) (kiri) dan termal digital (kanan) pada sampel tanaman di lapangan berdasarkan jenis virus yang menginfeksi. PYLCV, *Pepper yellow leaf curl virus*; ChiVMV, *Chili veinal mottle virus*; dan PepMV, *Pepper mottle virus*.

gelap daripada sampel tanaman lain. Citra digital pada sampel tanaman yang terinfeksi campuran PYLCV dan ChiVMV dengan suhu tertinggi (25.68 °C) tampak berwarna kuning.

PEMBAHASAN

Perubahan suhu dan citra digital tanaman terbukti dapat membedakan antara tanaman sehat dan tanaman yang terinfeksi PYLCV. Hal yang sama dilaporkan oleh Oerke *et al.* (2006) yang menggunakan inframerah termal untuk mendeteksi *Pseudoperonospora*

cubensis penyebab penyakit embun bulu pada mentimun. Pada 7 HSI terjadi perbedaan suhu 0.6 °C, yaitu lebih tinggi pada bagian bercak nekrotik dibandingkan dengan daun yang tidak terinfeksi. Data penelitian Zhu *et al.* (2018) tentang infeksi CMV pada tanaman tomat menunjukkan bahwa rata-rata suhu daun tomat lebih tinggi sebesar 0.6 °C pada hari ketiga setelah inokulasi CMV daripada sebelum inokulasi. Selain perubahan suhu, juga terjadi perubahan warna citra digital pada daun tomat yang diinokulasi.

Infeksi campuran cenderung menyebabkan peningkatan suhu yang disebabkan oleh konsentrasi virus yang lebih tinggi atau interaksi sinergis antar virus. Subekti *et al.* (2006) menyatakan bahwa konsentrasi virus di dalam jaringan tanaman yang terinfeksi virus secara tunggal umumnya lebih rendah dibandingkan dengan tanaman yang terinfeksi ganda/campuran. Pada tanaman yang terinfeksi ganda terjadi interaksi antara kedua virus yang bersifat meningkatkan kemampuan salah satu atau kedua virus dalam proses perkembangan dan penyebarannya di dalam sel tanaman terinfeksi.

Data pengukuran suhu daun dari sampel di rumah kaca dan lapangan mengonfirmasi perbedaan suhu antara tanaman sehat dengan tanaman terinfeksi virus dan antara tanaman yang terinfeksi jenis virus berbeda. Salah satu faktor yang berpengaruh terhadap suhu daun ialah aktivitas stomata, yaitu mengatur keseimbangan karbon dan air dengan cara mengendalikan proses fotosintesis dan transpirasi (Pineda *et al.* 2020). Konduktansi stomata terhadap air terkait dengan toleransinya terhadap tekanan lingkungan, termasuk cekaman biotik yang disebabkan oleh infeksi virus. Pengukuran bukaan stomata selama tahap awal patogenesis menunjukkan bahwa penurunan kadar air dari jaringan yang terinfeksi pada 2 HSI bertepatan dengan sedikit peningkatan pembukaan stomata (Oerke *et al.* 2006). Dilaporkan oleh Murray *et al.* (2016) bahwa infeksi TMV dapat mereduksi laju transpirasi pada tanaman secara nyata. Demikian pula Taufik *et al.* (2013) menyatakan bahwa terdapat hubungan antara faktor suhu sebesar 56.6% terhadap faktor perkembangan penyakit TMV. Data analisis citra digital daun dari sampel di rumah kaca dan lapangan mengonfirmasi perbedaan reflektansi cahaya antara tanaman sehat dengan tanaman terinfeksi virus dan antara tanaman yang terinfeksi jenis virus berbeda. Pigmen klorofil daun yang terdegradasi akibat infeksi virus dapat menyebabkan gangguan terhadap fungsi klorofil dalam proses fotosintesis. Gangguan terhadap klorofil tersebut dapat ditangkap berdasarkan reflektansi cahaya

merah, hijau dan biru (RGB) menggunakan sensor kamera digital. Selama proses fotosintesis klorofil dalam kloroplas akan menyerap lebih banyak cahaya merah (630–680 nm) dan biru (450–520 nm) dibandingkan dengan cahaya hijau (520–600 nm) (Kitchen dan Goulding 2001). Oleh karena itu citra digital tanaman yang terinfeksi virus akan lebih terang dibandingkan dengan tanaman sehat. Pencitraan digital yang didasarkan pada analisis perbedaan suhu antara daun terinfeksi dan daun sehat merupakan metode alternatif untuk melakukan deteksi penyakit secara dini, yaitu sebelum gejala penyakit muncul secara kasat mata (Ishimwe *et al.* 2014). Peng *et al.* (2022) melaporkan potensi pendekatan citra digital (*multispectral imaging* dan *spatial-spectral machine learning*) untuk mendeteksi penyakit pada ubi kayu (*cassava brown streak disease*) sebelum gejala visual muncul. Walaupun demikian, Fang dan Ramasamy (2015) menjelaskan bahwa metode termografi sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan pada saat perekaman suhu dan citra tanaman. Selain itu, metode ini juga tidak spesifik untuk target penyakit tertentu.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa metode termografi menggunakan kamera termal dapat merekam perubahan suhu dan citra digital daun tanaman cabai sejak infeksi dini PYLCV, yaitu sebelum gejala visual muncul. Tanaman yang terinfeksi virus mengalami peningkatan suhu dibandingkan dengan tanaman yang bebas virus. Bilangan digital dari citra tanaman yang terinfeksi virus cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman yang bebas virus. Pemanfaatan kamera termal FLIR One Pro-IOs untuk merekam citra digital tanaman sakit dalam metode termografi perlu dikembangkan lebih lanjut, terutama untuk aplikasinya pada skala lapangan yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dana dari Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pertanian (BPPSDMP) Kementerian

Pertanian, serta Balai Besar Uji Standar Karantina Pertanian yang telah memberikan fasilitas selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Annisaa NW, Hidayat P, Giyanto, Hidayat SH, Lee S. 2021. Multiple infection of Begomovirus on its host plants. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 694(1):1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/694/1/012047>.
- Clark MF, Adams AN. 1977. Characteristics of the microplate method of enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of plant viruses. Journal of General Virology. 34:475–483. DOI: <https://doi.org/10.1099/0022-1317-34-3-475>.
- Doyle JJ, Doyle JL. 1987. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. Phytochemical Bulletin. 19(1):11–15.
- Fang Y, Ramasamy RP. 2015. Current and prospective methods for plant disease detection. Biosensors. 5(3):537–561. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios5030537>.
- Ishimwe R, Abutaleb K, Ahmed F. 2014. Application of thermal imaging in agriculture- a review. Advances in Remote Sensing. 3:128–140. DOI: <https://doi.org/10.4236/ars.2014.33011>.
- Kitchen NR, Goulding KWT. 2001. On-farm technologies and practices to improve nitrogen use efficiency. Di dalam: Follett RF, Hatfield JL, editor. *Nitrogen in the Environment: Sources, Problems and Management*. Amsterdam(DL): Elsevier B.V. hlm 335–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044450486-9/50015-7>.
- Li R, Salih S, Hurtt S. 2004. Detection of Geminiviruses in sweetpotato by polymerase chain reaction. Plant Dis. 88(12):1347–1351. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.12.1347>.
- Mulyasa AK, Pradiana W, Nasruddin W. 2020. Fungsi kelompok tani dalam pengendalian hama terpadu pada tanaman padi di Kecamatan Sukaraja Kabupaten Tasikmalaya Provinsi Jawa Barat. Jurnal Inovasi Penelitian. 1(3):429–434.
- Murray RR, Emblow MSM, Hetherington AM, Foster GD. 2016. Plant virus infections control stomatal development. Scientific reports. 6(1):1–7. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34507>.
- Oerke EC, Steiner U, Dehne HW, Lindenthal M. 2006. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. Journal of Experimental Botany. 57(9):2121–2132. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erj170>.
- Pineda M, Barón M, Pérez-Bueno M. 2020. Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. Remote Sensing. 13(1):68. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13010068>.
- Peng Y, Dallas MM, Ascencio-Ibáñez JT, Hoyer JS, Legg J, Hanley-Bowdoin L, Grieve B, Yin H. 2022. Early detection of plant virus infection using multispectral imaging and spatial-spectral machine learning. Scientific Reports. 12(1):3113. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06372-8>.
- Rojas MR, Gilbertson RL, Russell DR, Maxwell DP. 1993. Use of degenerate primers in the polymerase chain reaction to detect whitefly-transmitted geminiviruses. Plant Disease. 77:340–347. DOI: <https://doi.org/10.1094/PD-77-0340>.
- Selangga DGW, Hidayat SH, Susila AD, Wiyono S. 2019. The effect of silica (SiO₂) to the severity of yellow leaf curl disease on chili pepper. Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia. 23(1):54–60. DOI: <https://doi.org/10.22146/jpti.38951>.
- Selangga DGW, Wiyono S, Susila AD, Hidayat SH. 2021. Distribution and identification of *Pepper yellow leaf curl Indonesia virus* infecting chili pepper in Bali. Jurnal Fitopatologi Indonesia. 17(6):217–224. DOI: <https://doi.org/10.14692/jfi.17.6.217-224>.
- Subekti D, Hidayat SH, Nurhayati E, Sujiprihati S. 2006. Infeksi *Cucumber mosaic virus* dan *Chili vein mottle virus* terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman

- cabai. *Hayati*. 13(2):53–57. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1978-3019\(16\)30381-3](https://doi.org/10.1016/S1978-3019(16)30381-3).
- Sutrawati M, Djamilah, Kinata A. 2012. Infeksi *Cucumber mosaic virus* dan *Chili veinal mottle virus* pada cabai di Kabupaten Rejang Lebong, Bengkulu. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*. 8(4):110–115. DOI: <https://doi.org/10.14692/jfi.8.4.110>.
- Taufik M, Sarawa AH, Kiki A. 2013. Analisis pengaruh suhu dan kelembapan terhadap perkembangan penyakit TMV (*Tobacco Mosaic Virus*) pada tanaman cabai. *Jurnal Agroteknos*. 3(2):94–100.
- Zhu W, Chen H, Ciechanowska I, Spaner D. 2018. Application of infrared thermal imaging for the rapid diagnosis of crop disease. *IFAC Papers OnLine*. 51–17:424–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.184>.