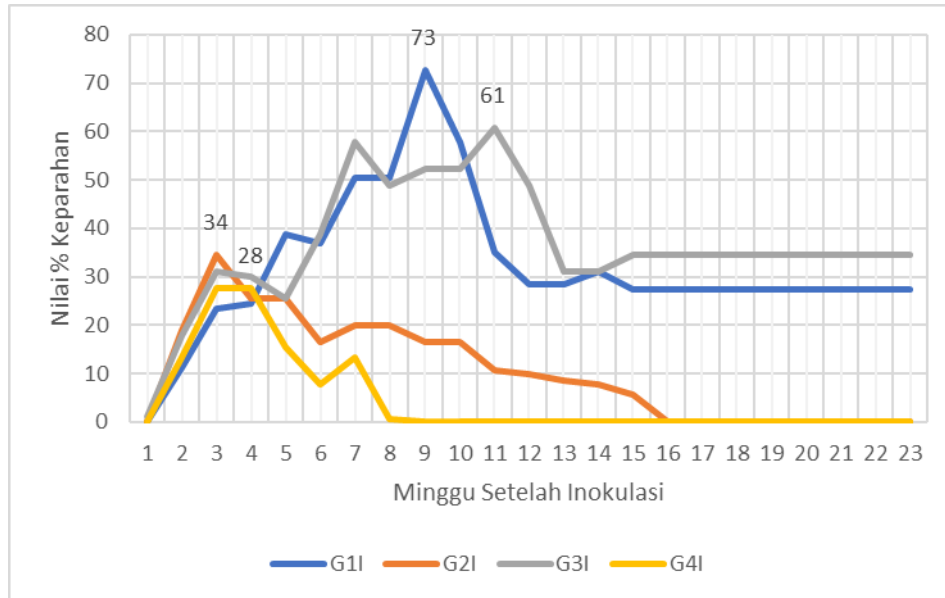


IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 HASIL

4.1.1 Respons Ketahanan Genotipe Cabai Besar Terhadap Penyakit Keriting Kuning

4.1.1.1 Perkembangan Penyakit Kuning Pada Genotipe F1 Cabai Hasil Persilangan Interspesifik *Capsicum annum* L. dan *Capsicum frutenscense*



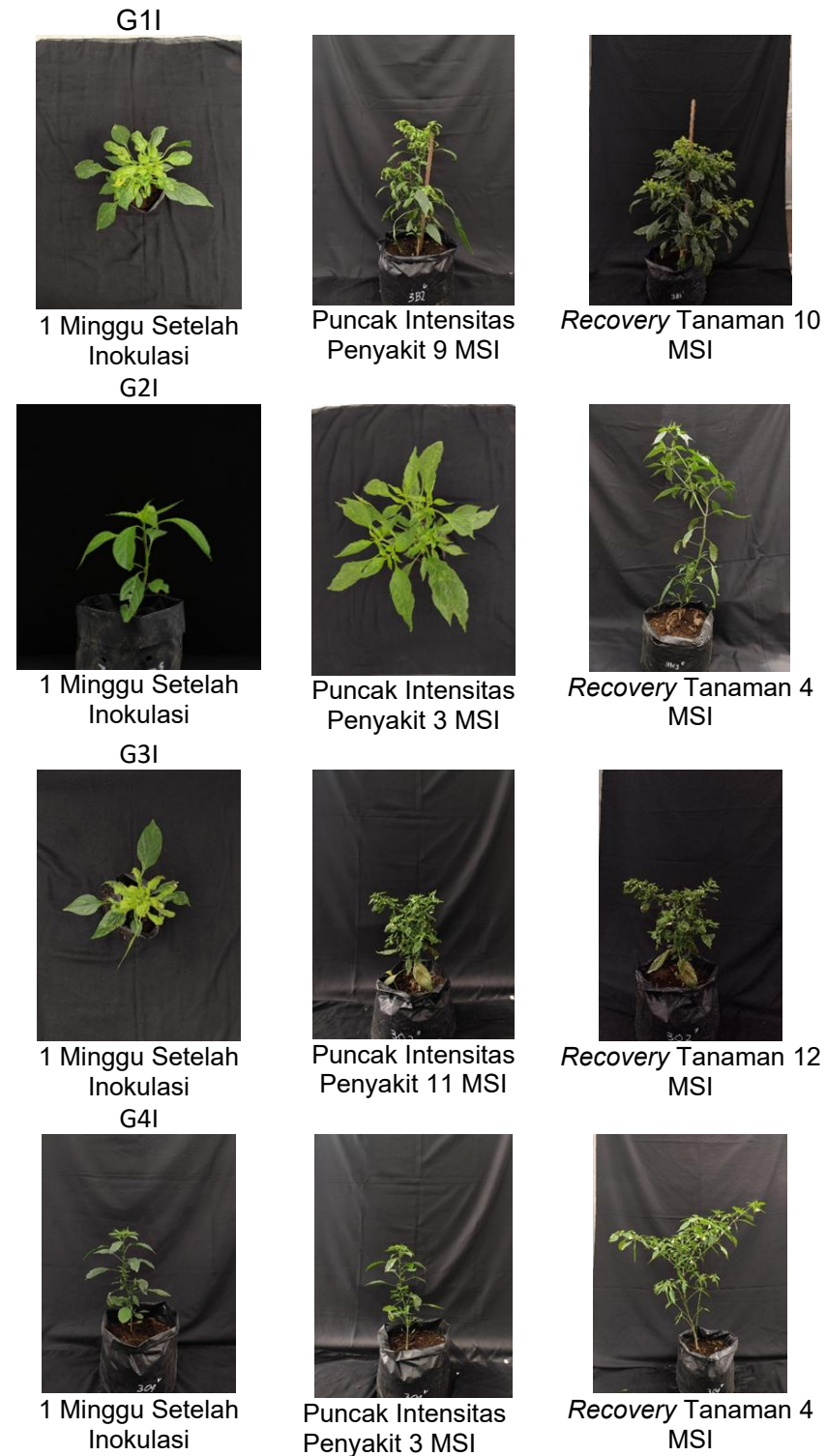
Keterangan : I: Inokulasi

Gambar 4. 1 Grafik Perkembangan Penyakit Keriting Kuning

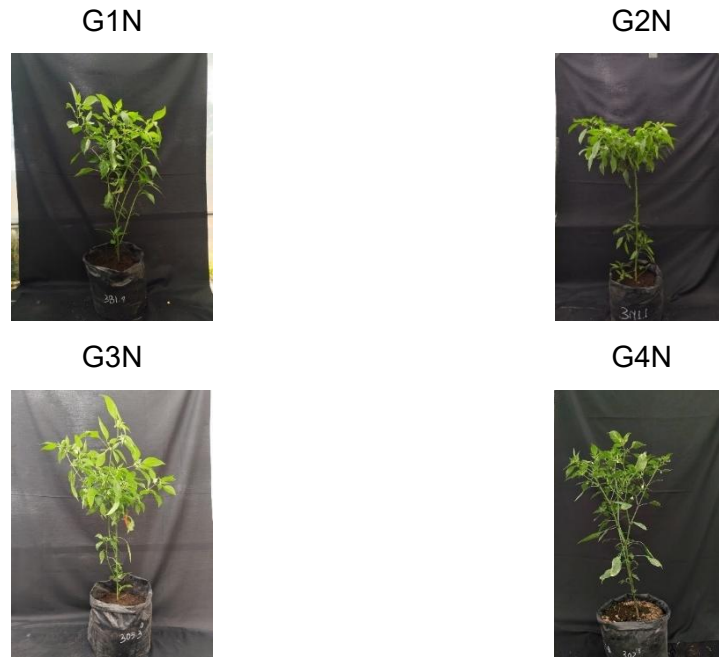
Berdasarkan hasil data pada Gambar 4.1 Grafik Perkembangan Penyakit Keriting Kuning, data dari minggu ke-1 hingga ke-23 setelah inokulasi menunjukkan adanya dinamika infeksi yang bervariasi. Pada minggu kedua setelah inokulasi ada perlakuan G1I menunjukkan adanya peningkatan pada minggu ke-2 (11%), mencapai puncak tertinggi pada minggu ke-9 (73%), dan kemudian menurun hingga stabil di angka 27% dari minggu ke-15 sampai minggu ke-23 akibat kejenuhan gejala pada jaringan tanaman yang telah terinfeksi penuh. Perlakuan G2I menunjukkan peningkatan pada minggu ke-2 (19%) dengan puncak awal yang lebih rendah pada minggu ke-3 (34%), sebelum akhirnya menurun secara bertahap hingga menyentuh angka 0% mulai minggu ke-16 hingga akhir pengamatan karena tunas-tunas baru tidak terinfeksi dan tanaman mengalami pemulihan (*recovery*). Sementara itu, perlakuan G3I mulai meningkat pada minggu ke-2 (18%), mencatatkan puncak tertinggi pada minggu ke-11 (61%), dan menurun hingga konstan di angka 34% pada minggu ke-15 sampai akhir pengamatan akibat keterbatasan laju infeksi baru pada jaringan yang telah jenuh. Adapun perlakuan

G4I mulai menunjukkan gejala pada minggu ke-2 (13%) dengan puncak yang relatif rendah pada minggu ke-3 dan ke-4 (28%), lalu turun drastis hingga mencapai 0% mulai minggu ke-10 sampai minggu ke-23.

4.1.1.2 Laju Perkembangan Penyakit dan *Area Under Disease Progress Curve* (AUDPC) Penyakit Keriting Kuning pada Tanaman Cabai Besar



Gambar 4. 2 Perkembangan Intensitas Penyakit Tanaman Cabai



Gambar 4. 3 Tanaman Cabai Non Inokulasi

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Tabel 4.1 mengenai Laju Perkembangan Penyakit dan *Area Under Disease Progress Curve* (AUDPC) Penyakit Keriting Kuning pada Tanaman Cabai Besar, masing-masing genotipe menunjukkan pola ketahanan yang berbeda. Pada genotipe G1I, akumulasi penyakit pada fase awal (AUDPC 1) melonjak dari 38.97 hingga 439.44 (7 hari setelah inokulasi hingga 63 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.9796, kemudian pada fase penurunan (AUDPC 2) turun dari 439.44 ke 191.85 (63-161 hari setelah inokulasi) dengan laju penurunan 0.6124, dengan rata-rata intensitas penyakit sebesar 31.82% yang dikategorikan Rentan. Genotipe G2I mencatatkan AUDPC 1 dari 66.11 hingga 210.00 (7 hari setelah inokulasi hingga 21 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.8679, lalu AUDPC 2 turun drastis dari 210.00 menuju 0.00 (21-161 hari setelah inokulasi) dengan laju penurunan 0.9164, dan berhasil menekan rata-rata intensitas penyakit hingga 10.43% yang dikategorikan Tahan. Sementara itu, genotipe G3I menunjukkan AUDPC 1 dari 81.67 hingga 373.33 (7 hari setelah inokulasi hingga 70 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.8742, dilanjutkan AUDPC 2 dari 399.26 turun ke 241.11 (70-161 hari setelah inokulasi) dengan laju penurunan 0.2236, serta memiliki rata-rata intensitas penyakit tertinggi yaitu 36.26% yang dikategorikan Rentan. Terakhir, genotipe G4I memiliki AUDPC 1 dari 54.44 hingga 194.44 (7 hari setelah inokulasi hingga 21 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.9749, serta AUDPC 2 yang turun dari 194.44 menuju 0.00 (21-161 hari setelah inokulasi) dengan laju

penurunan 0.4188, sehingga sukses mencapai rata-rata intensitas penyakit 4.65% dan dikategorikan sebagai Tahan.

Tabel 4. 1 Laju Perkembangan Penyakit dan *Area Under Disease Progress Curve* (AUDPC) Penyakit Keriting Kuning pada Tanaman Cabai Besar

Genotipe	AUDPC 1	r^1 (laju perkembangan)	AUDPC 2	r^1 (laju penurunan)	Intensitas Penyakit (*) (%)	Kategori Ketahanan
G1I	15049,62	0.9796	20425.74	0.6124	31.82 %	Rentan
G2I	2273,06	0.8679	7830.93	0.9164	10.43 %	Agak Tahan
G3I	19804.17	0.8742	20779.6	0.2236	36.26 %	Rentan
G4I	3089,72	0.9749	1810.28	0.4188	4.65 %	Tahan

Keterangan : I: Inokulasi; *: rata- rata intensitas penyakit akhir pengamatan

Berdasarkan Tabel 4.1 yang menyajikan data laju perkembangan penyakit dan *Area Under Disease Progress Curve* (AUDPC) Penyakit Keriting Kuning pada Tanaman Cabai Besar, terdapat empat genotipe yang diuji, yaitu G1I, G2I, G3I, dan G4I dengan tingkat ketahanan yang bervariasi. Genotipe G1I mencatatkan nilai AUDPC 1 (kenaikan hingga puncak) sebesar 15049,62 dengan laju perkembangan 0,9796, serta AUDPC 2 (penurunan dari puncak) sebesar 20425.74 dengan laju penurunan 0,6124, yang berujung pada intensitas penyakit akhir mencapai 31.82 % sehingga dikategorikan sebagai tanaman yang Rentan. Sementara itu, genotipe G2I menunjukkan ketahanan yang lebih baik dengan nilai AUDPC 1 (kenaikan hingga puncak) sebesar 2273,06 dengan nilai laju perkembangan 0,8679 dan AUDPC 2 (penurunan dari puncak) sebesar 7830.93 (laju penurunan 0,9164), di mana intensitas penyakit akhirnya 10.43 % sehingga masuk dalam kategori Tahan.

Selanjutnya, pada genotipe G3I tercatat nilai AUDPC 1 (kenaikan hingga puncak) yang paling tinggi yaitu 19804,17 dengan laju perkembangan 0,8742, serta AUDPC 2 (penurunan dari puncak) sebesar 20779.6 dengan laju penurunan 0,2236, yang mengakibatkan intensitas penyakit akhir paling tinggi sebesar 36.26 % dan dikategorikan sebagai Rentan. Di sisi lain, genotipe G4I menunjukkan performa ketahanan paling optimal terhadap penyakit keriting kuning karena memiliki intensitas penyakit akhir 4.65 % dengan kategori Tahan, meskipun mencatatkan nilai AUDPC 1 (kenaikan hingga puncak) sebesar 3089,72 (laju perkembangan 0,9749) dan AUDPC 2 (penurunan dari puncak) sebesar 1810.28 (laju penurunan 0,4188). Secara keseluruhan, data ini memperlihatkan bahwa

genotipe G4I dan G2I memiliki ketahanan yang jauh lebih unggul dibandingkan G1I dan G3I yang rentan terhadap serangan penyakit tersebut.

4.1.2 Pertumbuhan Agronomis pada Tanaman Cabai Besar

Tabel 4. 2 Rata-rata Tinggi Tanaman (cm) Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annuum*)

Perlakuan	Minggu setelah tanam					
	11	12	13	14	15	16
G1I	32.95 a	36.28 b	39.41 b	43.71 ab	46.68 ab	48.20 b
G2I	52.92 a	57.37 a	65.78 a	73.10 a	75.84 a	78.00 a
G3I	32.00 a	34.14 b	36.93 b	39.45 b	40.63 b	42.02 b
G4I	51.91 a	64.46 a	67.62 a	71.15 a	73.57 a	76.22 a
G1N	54.67 a	58.33 a	66.49 a	72.42 a	76.51 a	79.83 a
G2N	55.00 a	60.37 a	64.03 a	68.47 a	73.13 a	76.21 a
G3N	41.57 a	46.89 ab	51.70 ab	57.50 a	60.70 a	63.88 ab
G4N	35.07 a	50.98 ab	54.37 ab	55.21 a	56.17 ab	56.98 ab
KK	19.67%	15.82%	15.11%	14.10%	12.95%	12.43%

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama berarti tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%; I: Inokulasi; N: Non Inokulasi

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan inokulasi dan non inokulasi berpengaruh tidak nyata terhadap pertumbuhan tinggi tanaman pada umur 11 MST, tetapi berpengaruh nyata pada umur 12, 13, 14, 15, 16 MST. Selain itu, berdasarkan uji Tukey taraf 5% (Tabel 4.2), pada pengamatan 11 MST, seluruh perlakuan menunjukkan pengaruh yang tidak berbeda nyata pada. Perbedaan yang nyata mulai terlihat pada 12 MST, di mana perlakuan G1I dengan tinggi 36,28 cm berbeda nyata dengan perlakuan G1N dengan tinggi 58,33 cm tetapi perlakuan G2I, G3I, dan G4I tidak berbeda nyata dengan genotipe kontrolnya. Pada 13 MST, perbedaan nyata tetap berlanjut dengan perlakuan G1I dengan tinggi 36,28 cm berbeda nyata dengan perlakuan G1N dengan tinggi 58,33 cm, G2I, G3I, dan G4I tidak berbeda nyata dengan genotipe kontrolnya. Umur 14 MST perlakuan G1I, G2I, dan G4I tidak berbeda nyata dengan genotipe kontrolnya namun, perlakuan G3I dengan tinggi 39,45 cm berbeda nyata dengan G3N dengan tinggi 57,50 cm. Memasuki 15 MST, perlakuan kembali menunjukkan perbedaan yang nyata pada perlakuan G1I dengan nilai 46,68 cm dengan perlakuan G1N yaitu dengan tinggi 76,61 cm, pada perlakuan G2I, G3I, dan G4I tidak berbeda nyata dengan perlakuan kontrolnya G2N, G3N, dan G4N. G4I (73,57). Pada pengamatan akhir yaitu 16 MST, menunjukkan perbedaan yang nyata, di mana perlakuan G1N (79,83 cm) memberikan hasil tertinggi yang berbeda nyata dengan perlakuan G1I (48,20 cm),

sedangkan pada perlakuan G2I, G3I, dan G4I tidak berbeda nyata dengan perlakuan kontrolnya.

Tabel 4. 3 Rata-rata Diameter Batang (mm) Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annuum*)

Perlakuan	Minggu setelah tanam					
	11	12	13	14	15	16
G1I	4.88 a	5.11 ab	5.72 ab	6.55 a	6.71 a	6.85 a
G2I	4.85 a	5.04 ab	6.10 ab	6.83 a	6.93 a	7.02 a
G3I	4.60 a	5.00 ab	5.39 ab	5.40 a	5.70 a	5.82 a
G4I	4.73 a	6.12 a	6.95 a	7.71 a	7.93 a	7.99 a
G1N	3.88 a	4.49 ab	5.18 ab	5.45 a	6.08 a	6.97 a
G2N	3.91 a	4.68 ab	4.48 ab	5.32 a	5.80 a	6.28 a
G3N	3.36 a	3.79 b	3.83 b	4.79 a	6.05 a	6.99 a
G4N	3.34 a	3.78 b	4.76 ab	5.40 a	6.36 a	7.34 a
KK	17.64%	15.75%	20.13%	19.65%	26.53%	15.56%

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama berarti tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%; I: Inokulasi; N: Non Inokulasi

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan inokulasi dan non inokulasi berpengaruh tidak nyata terhadap pertumbuhan diameter batang pada umur 11, 13, 14, 15, dan 16 MST, tetapi berpengaruh nyata pada umur 12 MST. Berdasarkan hasil uji lanjut Tukeys taraf 5% (tabel 4.3) Pada pengamatan awal 11 MST, seluruh perlakuan menunjukkan perbedaan yang tidak nyata dengan nilai rerata berkisar antara 3,34 mm hingga 4,88 mm. Perbedaan yang nyata mulai terlihat pada 12 MST, di mana perlakuan G4I menunjukkan nilai tertinggi (6,12 mm) yang berbeda nyata dengan perlakuan G4N (3,78 mm). Pada 13, 14, 15, dan 16 MST, seluruh perlakuan inokulasi yakni G1I, G2I, G3I, dan G4I menunjukkan tidak berbeda nyata dengan perlakuan non inokulasi atau kontrolnya yaitu G1N, G2N, G3N, dan G4N.

Tabel 4. 4 Rata-rata Panjang Internode (cm) Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annuum*)

Perlakuan	Minggu setelah tanam					
	11	12	13	14	15	16
G1I	1.99 a	1.99 a	2.11 a	2.37 a	2.46 ab	2.51 cd
G2I	2.41 a	2.48 a	2.63 a	2.72 a	3.01 a	3.06 ab
G3I	1.79 a	1.79 a	1.91 a	2.04 a	2.11 b	2.22 d
G4I	2.47 a	2.68 a	2.68 a	2.74 a	2.76 a	2.78 bc
G1N	1.88 a	1.79 a	1.95 a	2.23 a	2.42 ab	2.72 bc
G2N	2.22 a	2.31 a	2.40 a	2.54 a	3.02 a	3.27a
G3N	1.61 a	1.86 a	1.95 a	2.08 a	2.18 ab	2.48 cd
G4N	2.06 a	2.28 a	2.46 a	2.60 a	2.70 b	2.78 bc
KK	23.52%	21.30%	18.94%	16.74%	11.75%	11.33%

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama berarti tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%; I: Inokulasi; N: Non Inokulasi

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) dan Uji lanjut Tukeys taraf 5% menunjukkan bahwa seluruh perlakuan inokulasi dan non inokulasi tidak berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan panjang internode pada umur 11 hingga 16 MST. Umur 11 MST perlakuan G1I (1,99 cm) tidak berbeda nyata dengan perlakuan G1N (1,88 cm), G2I (2,41 cm) tidak berbeda nyata dengan G2N (2,22 cm), G3I (1,79 cm) tidak berbeda nyata dengan G3N (1,61 cm), dan G4I (2,47 cm) tidak berbeda nyata dengan G4N (2,06 cm). Umur 12 MST perlakuan G1I (1,99 cm) tidak berbeda nyata dengan perlakuan G1N (1,79 cm), G2I (2,48 cm) tidak berbeda nyata dengan G2N (2,31cm), G3I (1,79 cm) tidak berbeda nyata dengan G3N (1,86 cm), dan G4I (2,68 cm) tidak berbeda nyata dengan G4N (2,28 cm). Umur 13 MST perlakuan G1I (2,11 cm) tidak berbeda nyata dengan perlakuan G1N (1,95 cm), G2I (2,63 cm) tidak berbeda nyata dengan G2N (2,40 cm), G3I (1,91 cm) tidak berbeda nyata dengan G3N (1,95 cm), dan G4I (2,68 cm) tidak berbeda nyata dengan G4N (2,46 cm).

Umur 14 perlakuan G1I (2,37 cm) tidak berbeda nyata dengan perlakuan G1N (2,23 cm), G2I (2,72 cm) tidak berbeda nyata dengan G2N (2,54 cm), G3I (2,04 cm) tidak berbeda nyata dengan G3N (2,08 cm), dan G4I (2,74 cm) tidak berbeda nyata dengan G4N (2,60 cm). Umur 15 perlakuan G1I (2,46 cm) tidak berbeda nyata dengan perlakuan G1N (2,42 cm), G2I (3,01 cm) tidak berbeda nyata dengan G2N (3,02 cm), G3I (2,11 cm) tidak berbeda nyata dengan G3N (2,18 cm), dan G4I (2,76 cm) tidak berbeda nyata dengan G4N (2,70 cm). Umur 16 MST menunjukkan hal yang sama dimana G1I (2,51 cm) yang tidak berbeda nyata dengan G1N (2,72 cm), G2I (3,06 cm) tidak berbeda nyata dengan G2N

(3,27 cm), G3I (2,22 cm) tidak berbeda nyata dengan G3N (2,48 cm), dan G4I (2,78 cm) tidak berbeda nyata dengan G4N (2,78 cm).

Tabel 4. 5 Rata-rata Jumlah Cabang Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annum*)

Perlakuan	Minggu setelah tanam					
	11	12	13	14	15	16
G1I	5.89 c	6.11 d	5.00 d	6.00 c	6.67 c	7.11 c
G2I	6.33 c	6.22 d	12.56 c	13.56 bc	15.00 bc	15.78 bc
G3I	5.00 c	5.44 d	7.89 d	8.33 c	9.67 c	9.89 c
G4I	3.00 c	5.00 d	11.33 c	12.45 bc	14.44 bc	14.78 bc
G1N	13.89 bc	14.55 c	16.34 bc	17.78 abc	20.00 abc	20.89 abc
G2N	17.11 a	20.89 a	22.55 a	24.67 a	27.33 a	28.89 a
G3N	15.78 ab	18.89 ab	21.11 ab	23.67 a	27.11 a	28.33 a
G4N	13.89 bc	15.78 bc	17.56 bc	20.78 ab	23.22 ab	26.34 ab
KK	21.62%	21.37%	20.79%	20.83%	21.63%	21.60%

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama berarti tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%; I: Inokulasi; N: Non Inokulasi

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan inokulasi dan non inokulasi berpengaruh nyata terhadap jumlah cabang pada umur 11 hingga 16 MST. Berdasarkan hasil uji lanjut Tukey's taraf 5% (Tabel 4.5) pada umur pengamatan 11 MST, hasil rerata jumlah cabang berkisar antara 3,00 hingga 17,11. Perlakuan G1I (5,89) berbeda nyata dengan G1N (13,89), G2I (6,33) berbeda nyata dengan G2N memberikan nilai tertinggi yakni 17,11 pada setiap minggu pengamatan, G3I (5,00) berbeda nyata dengan G3N (15,78), dan G4I (3,00) berbeda nyata dengan G4N (13,89). Pada umur pengamatan 12 MST, rerata nilai berkisar antara 5,00 hingga 20,89, di mana perlakuan G1I (6,11) berbeda nyata dengan G1N (14,55), G2I (6,22) berbeda nyata dengan G2N memberikan nilai tertinggi sebesar 20,89, G3I (5,44) berbeda nyata dengan perlakuan G3N (18,89), dan G4I (5,00) berbeda nyata dengan perlakuan G4N (15,78).

Pada umur 13, 14 , 15, dan 16 menunjukkan pola yang sama di mana seluruh perlakuan memperlihatkan adanya perbedaan yang nyata. Pada umur pengamatan 16 MST, perlakuan G1I (7,11) berbeda nyata dengan G1N (20,89), G2I (15,78) berbeda nyata dengan G2N memberikan nilai tertinggi sebesar 28,89, G3I (9,89) berbeda nyata dengan perlakuan G3N (28,33), dan G4I (14,78) berbeda nyata dengan perlakuan G4N (26,34).

Tabel 4. 6 Jumlah Cabang, Bunga, Buah, Umur Bunga, dan % Buah Jadi Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annuum*)

Perlakuan	J. Cabang	J. Bunga	AUDPC 1	J. Cabang	U.Bunga	J. Bunga	J. Buah	% Buah Jadi	AUDPC 2
G1I	30.12	21	15049,62	58.33	48.55 a	54	19 c	35%	20425.74
G2I	3	0	2273,06	82.78	45.44 a	447	144 c	32%	7830.93
G3I	10.4	10	19804.17	69.33	55.56 a	211	59 c	28%	20779.6
G4I	3.7	0	3089,72	73.87	39.89 a	360	294 a	82%	1810.28
G1N	0	0	0	931	33.55 a	280	153 bc	55%	0
G2N	0	0	0	1253	35.00 a	393	130 c	33%	0
G3N	0	0	0	1214	38.33 a	285	202 ab	71%	0
G4N	0	0	0	1058	52.11 a	239	219 a	92%	0

Keterangan: I: Inokulasi; N: Non Inokulasi

Berdasarkan data (Tabel 4.6) menunjukkan bahwa pada kelompok perlakuan inokulasi, genotipe G1I memiliki jumlah cabang awal 30,12 dan jumlah bunga awal 21 yang berkaitan dengan nilai AUDPC 1 sebesar 15049,62, serta pada fase setelahnya menghasilkan jumlah cabang 59,33, jumlah bunga 54, jumlah buah 19, persentase buah jadi 35%, dan nilai AUDPC 2 sebesar 20425.74. Genotipe G2I mencatatkan jumlah cabang awal 3 dan jumlah bunga awal 0 dengan nilai AUDPC 1 sebesar 2273,06, serta pada fase berikutnya menunjukkan perkembangan pesat dengan jumlah cabang 82,78, jumlah bunga 447, jumlah buah 144, persentase buah jadi 32%, dan nilai AUDPC 2 sebesar 7830.93. Genotipe G3I memiliki jumlah cabang awal 10,4 dan jumlah bunga awal 10 dengan nilai AUDPC 1 sebesar 19804,17, serta pada periode lanjutan menghasilkan jumlah cabang 69,33, jumlah bunga 211, jumlah buah 59, persentase buah jadi 28%, dan nilai AUDPC 2 sebesar 20779.6. Adapun genotipe G4I menunjukkan jumlah cabang awal 3,7 dan jumlah bunga awal 0 dengan nilai AUDPC 1 sebesar 3089,72, serta menghasilkan performa optimal pada fase berikutnya dengan jumlah cabang 73,87, jumlah bunga 360, jumlah buah tertinggi mencapai 294, persentase buah jadi tertinggi sebesar 82%, dan diiringi oleh nilai AUDPC 2 terendah sebesar 1810.28. Sementara itu, pada kelompok perlakuan non-inokulasi (G1N, G2N, G3N, dan G4N), nilai AUDPC 1 dan AUDPC 2 tercatat sebesar 0 akibat tidak adanya cekaman penyakit, dengan rincian G1N menghasilkan jumlah cabang 931, jumlah bunga 280, jumlah buah 153, dan persentase buah jadi 55%; G2N menghasilkan jumlah cabang 1253, jumlah bunga 393, jumlah buah 131, dan persentase buah jadi 33%; G3N menghasilkan jumlah cabang 1214, jumlah bunga 285, jumlah buah 202, dan persentase buah jadi 71%;

serta G4N menghasilkan jumlah cabang 1058, jumlah bunga 239, jumlah buah 219, dan persentase buah jadi tertinggi sebesar 92%.

Umur bunga menunjukkan bahwa perlakuan inokulasi dan non inokulasi berpengaruh tidak nyata terhadap pertumbuhan umur bunga pada umur 11 hingga 16 MST. Walaupun secara kasat mata angka reratanya berbeda dimana G1I umur berbunga 48,55 HST yang tidak berbeda nyata dengan G1N umur awal berbunga 33,55 HST, G2I (45,44 HST) tidak berbeda nyata dengan G2N (35,00 HST), G3I (55,56 HST) tidak berbeda nyata dengan G3N (38,33 HST), dan G4I (39,89 HST) tidak berbeda nyata dengan G4N (52,11 HST).

Tabel 4. 7 Jumlah Buah per tanaman, Berat 10 Buah (Gram), Berat rata-rata per Buah (Gram), dan Berat Total Buah per tanaman (Gram) Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annuum*)

Perla kuan	Jumlah Buah per Tanaman	Berat 10 Buah (Gram)	Berat rata- rata per Buah	Berat Total Buah per Tanaman (Gram)
G1I	19 c	6.33 e	0.63	11.97 b
G2I	144 c	25.00 a	2.5	360.00 ab
G3I	59 c	12.02 d	1.2	70.84 b
G4I	294 a	17.90 c	1.79	526.26 a
G1N	153 bc	17.97 c	1.8	274.89 ab
G2N	130 c	20.90 b	2.09	273.79 ab
G3N	202 ab	26.17 a	2.62	502.40 a
G4N	219 a	21.10 b	2.11	468.42 a
KK	72.15%	0.23%		136.31%

Keterangan: Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom yang sama berarti tidak berbeda nyata pada uji Tukey taraf 5%; I: Inokulasi; N: Non Inokulasi

Berdasarkan pada (Tabel 4.7), menunjukkan hubungan yang erat antara tingkat keparahan penyakit dan jumlah buah per tanaman, berat 1 buah, serta berat buah total. Perlakuan G1I yang memiliki skor AUDPC sangat tinggi sebesar 35.475,36 sehingga pada parameter jumlah buah per tanaman yaitu 19, dengan berat 10 buah 6,33 gram, yang berdampak pada sangat kecilnya berat 1 buah (0,63 gram) serta rendahnya berat buah total (11,97 gram), sementara pada perlakuan G1N jumlah buah per tanaman yaitu 153, dengan berat 10 buah 17,97 gram, berat 1 buah (1,80 gram), dan berat buah total (274,89 gram). Pada perlakuan G2I dengan AUDPC 11.465,09, tercatat jumlah buah per tanaman yaitu 144, dengan berat 10 buah 25,00 gram, berat 1 buah 2,50 gram, dan berat buah total 360,00 gram, sedangkan pada perlakuan G2N jumlah buah per tanaman yaitu 130, dengan berat 10 buah 20,90 gram, berat 1 buah 2,09 gram, buah dengan berat buah total 273,79 gram.

Perlakuan G3I yang memiliki AUDPC 14.373,33 mencatatkan jumlah buah per tanaman yaitu 59, dengan berat 10 buah 12,02 gram, berat 1 buah 1,20 gram, dan berat buah total 70,84 gram, namun pada perlakuan G3N jumlah buah per tanaman 202, berat 10 buah 26,17 gram dengan berat per 1 buah yaitu 2,62 gram dengan berat buah total mencapai 502,40 gram. Sementara itu, perlakuan G4I yang memiliki skor AUDPC rendah sebesar 4.900,00 mencatatkan jumlah buah per tanaman 294, dengan berat 10 buah 17,90 gram berat 1 buah 1,79 gram, serta menghasilkan berat buah total tertinggi di antara seluruh perlakuan yaitu 526,26 gram, yang tetap konsisten dengan perlakuan G4N yang menghasilkan berat buah total 468,42 gram.

4.1.3 Nilai Heritabilitas Agronomis Tanaman Cabai Besar Terhadap Penyakit

Tabel 4. 8 Nilai Heritabilitas

Heritabilitas														
Minggu ke-	Tinggi Tanaman		Diameter Batang		Jumlah Cabang		Panjang Internode		Umur Bunga		Jumlah Bunga		Jumlah Buah	
	Nilai	Kriteria	Nilai	Kriteria	Nilai	Kriteria	Nilai	Kriteria	Nilai	Kriteria	Nilai	Kriteria	Nilai	Kriteria
11	0.51	Tinggi	0.31	Sedang	0.86	Tinggi	0.05	Rendah	0.04	Rendah	0.27	Sedang	0.00	Rendah
12	0.61	Tinggi	0.42	Sedang	0.87	Tinggi	0.18	Rendah	0.04	Rendah	0.31	Sedang	0.20	Sedang
13	0.64	Tinggi	1.00	Tinggi	0.87	Tinggi	0.18	Rendah	0.04	Rendah	0.07	Rendah	0.26	Sedang
14	0.68	Tinggi	0.32	Sedang	0.71	Tinggi	0.12	Rendah	0.04	Rendah	-0.11	Rendah	0.39	Sedang
15	0.73	Tinggi	0.12	Rendah	0.71	Tinggi	0.50	Sedang	0.04	Rendah	0.33	Sedang	0.47	Sedang
16	0.75	Tinggi	0.03	Rendah	0.71	Tinggi	0.45	Sedang	0.04	Rendah	0.41	Sedang	0.67	Tinggi

Berdasarkan dari hasil perhitungan nilai heritabilitas pada (Tabel 4.8) pada tinggi tanaman, dan jumlah cabang dapat dilihat dari awal pengamatan hingga akhir memiliki nilai yang naik signifikan pada masing-masing pengamatan per-minggu yakni dengan kriteria Tinggi 87 yang dimana kontribusi ragam genetik relatif lebih besar terhadap variasi fenotipik pada kondisi penelitian yang berkisar antara 0,51–0,75 dan jumlah cabang berkisar antara 0,71–0,87. Karakter tinggi tanaman dan jumlah cabang mampu mempertahankan tinggi dan jumlah cabang di tengah tekanan penyakit keriting kuning mencerminkan potensi genetik yang kuat. Hal berbeda terjadi pada parameter umur bunga yang memiliki nilai konsisten sebesar 0,04 dari minggu ke-11 hingga ke-16, sehingga dikategorikan dalam kriteria Rendah yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan tekanan stres biotik infeksi virus, bukan semata-mata faktor genetik.

Pada parameter diameter batang, nilai heritabilitas menunjukkan adanya peningkatan yang sangat dinamis dari minggu ke-11 hingga minggu ke-16 setelah tanam. Pada minggu ke-11 dan ke-12, nilai heritabilitas berada di angka 0,31 dan 0,42 yang masuk dalam kriteria Sedang. Peningkatan drastis terjadi pada minggu ke-13, di mana nilai heritabilitas mencapai angka maksimal yaitu 1,00 dengan kriteria Tinggi. Namun, memasuki minggu ke-14, angka ini turun kembali ke 0,32 dengan kriteria Sedang, dan terus merosot tajam pada fase akhir pengamatan menjadi 0,12 pada minggu ke-15 hingga menyentuh angka terendah 0,03 pada minggu ke-16 (kriteria Rendah) yang dipengaruhi oleh pembengkakan akibat keparahan infeksi atau fisiologi penuaan jaringan.

Sementara itu, pada panjang internode, nilai heritabilitas menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya umur tanaman. Pada minggu ke-11 hingga ke-14, nilainya secara konsisten masuk ke dalam kriteria Rendah (berkisar antara 0,05–0,18). Namun, pada minggu ke-15 dan ke-16, nilainya mengalami peningkatan signifikan menjadi 0,50 dan 0,45 yang membuat statusnya naik kelas ke dalam kriteria Sedang. Dimana seleksi terhadap panjang internode tidak responsif pada awal pertumbuhan karena dominasi pengaruh lingkungan, tetapi dapat dipertimbangkan pada fase generatif akhir saat kontribusi genetik mulai mengekspresikan ketahanan tanaman terhadap pemendekan ruas (gejala kerdil akibat virus).

Parameter jumlah bunga menunjukkan pola fluktuasi dari minggu ke-11 hingga minggu ke-16. Pada minggu ke-11 dan ke-12, heritabilitas tercatat sebesar

0,27 dan 0,31 kriteria Sedang, lalu merosot tajam pada minggu ke-13 (0,07) dan minggu ke-14 (-0,11) ke kriteria Rendah akibat puncak timbulnya gejala penyakit yang memicu kerontokan bunga secara acak. Nilai heritabilitas kembali merangkak naik pada minggu ke-15 (0,33) dan mencapai puncaknya di minggu ke-16 sebesar 0,41 kriteria Sedang yang dipengaruhi oleh fluktuasi lingkungan/stres virus, sehingga seleksi tanaman tahan berdasarkan jumlah bunga sebaiknya dilakukan pada fase pemulihan (*recovery*) di akhir pengamatan saat pengaruh genetik kembali menguat. Parameter jumlah buah (yang diukur dari panen ke-1 hingga panen ke-6) menunjukkan peningkatan progresif, di mana pada panen ke-1 hingga ke-5 nilainya berada pada kriteria Rendah hingga Sedang (berkisar antara 0.00 hingga 0,47) akibat dari cekaman biotik (stres akibat infeksi virus), lalu melonjak tajam pada pengamatan akhir yaitu panen ke-6 (0,67) sehingga naik kelas ke kriteria Tinggi yang dikendalikan oleh genetik.

4.1.4 Nilai Korelasi Beberapa Parameter Agronomis Tanaman Terhadap Keparahan Penyakit Kuning

Tabel 4. 9 Korelasi Beberapa Parameter Agronomis Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annum*)

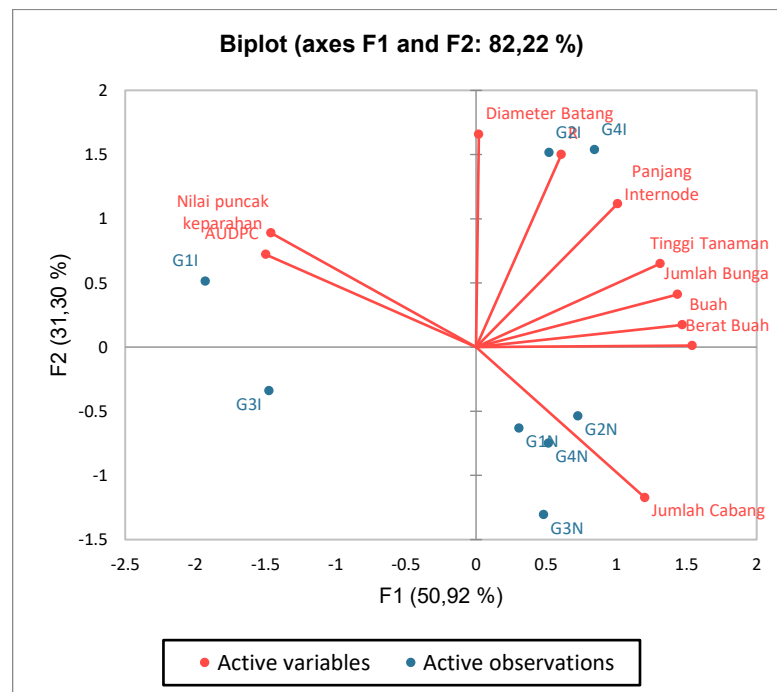
Parameter	AUDPC (r) (Kenaikan)	AUDPC (r) (Penurunan)
AUDPC	1	1
Tinggi Tanaman	0.530	-0.931
Diameter Batang	0.577	0.120
Panjang Internode	-0.466	-0.732
Jumlah Cabang	0.611	-0.696
Umur Bunga	0.892	0.898
Jumlah Bunga	0.915	-0.782
Jumlah Buah	-	-0.953

Keterangan : Tanda negatif menunjukkan hubungan berlawanan arah, Semakin besar (r), semakin kuat hubungan antar variabel. (*) signifikan pada $p < 0,05$, (**) signifikan pada $p < 0,01$.

Berdasarkan tabel hasil uji korelasi Pearson (Tabel 4.9) menunjukkan beberapa hubungan antarparameter pertumbuhan vegetatif, generatif, dan tingkat keparahan penyakit (AUDPC) tanaman. Hubungan negatif paling kuat terdapat antara AUDPC dan jumlah buah dengan nilai korelasi $r=-0,953$, diikuti tinggi tanaman ($r=-0,931$), jumlah bunga ($r=-0,782$), panjang internode ($r=-0,732$), dan jumlah cabang ($r=-0,696$), yang menunjukkan bahwa peningkatan akumulasi perkembangan penyakit cenderung berasosiasi dengan penurunan nilai karakter-

karakter tersebut. Sebaliknya, AUDPC berkorelasi positif kuat dengan umur berbunga ($r=0,898$), sehingga genotipe dengan AUDPC lebih tinggi cenderung memiliki umur berbunga yang lebih lama. Hubungan antara AUDPC dan diameter batang tergolong sangat lemah dengan arah positif ($r=0,120$), yang menunjukkan keterkaitan yang rendah antara kedua variabel. Berdasarkan nilai koefisien korelasi, jumlah buah dan tinggi tanaman merupakan karakter yang memiliki hubungan paling kuat dengan AUDPC dalam penelitian ini.

4.1.5 Analisis Multivariat pada Tanaman Cabai Besar Terhadap Penyakit Keriting Kuning



Gambar 4. 4 Grafik Biplot yang menunjukkan Pengelompokan Antara Genotipe, Perlakuan, dan Parameter Pada Beberapa Genotipe Tanaman Cabai Besar (*Capsicum annum*)

Berdasarkan analisis Biplot pada gambar di atas menunjukkan kelompok pertama di sebelah kanan terdiri dari parameter diameter batang, panjang internode, tinggi tanaman, jumlah bunga, buah, dan berat buah yang tampak hampir sejajar, artinya parameter-parameter tersebut memiliki hubungan positif yang kuat di mana genotipe dengan pertumbuhan vegetatif yang baik cenderung menghasilkan produksi yang lebih tinggi. Sementara itu, kelompok kedua di sebelah kiri yang mencakup parameter AUDPC dan nilai puncak keparahan memiliki vektor yang hampir sejajar, artinya AUDPC memiliki hubungan positif yang sangat kuat di mana genotipe dengan keparahan penyakit tinggi selama

periode pengamatan juga memiliki akumulasi perkembangan penyakit (AUDPC) yang tinggi. Arah antara kedua kelompok tersebut berlawanan hampir 180°, yang artinya adanya hubungan negatif berupa kecenderungan penurunan pertumbuhan vegetatif dan hasil tanaman seiring dengan semakin tingginya tingkat keparahan penyakit.

Parameter jumlah cabang, arah vektornya tetap positif ke kanan meskipun mengarah ke bawah, yang berarti jumlah cabang tetap berkorelasi negatif terhadap parameter penyakit dan berkorelasi positif dengan karakter hasil, meskipun memiliki kontribusi pada komponen utama yang berbeda dari karakter agronomi lainnya. Sedangkan pada genotipe, G1I dan G3I berasosiasi dengan tingginya nilai AUDPC dan keparahan penyakit sehingga menunjukkan kecenderungan tingkat ketahanan yang lebih rendah, sedangkan G4I dan G2I berasosiasi dengan karakter pertumbuhan yang baik seperti diameter batang dan panjang internode serta berada jauh dari vektor penyakit. Selain itu, genotipe yang tidak diinokulasi (seperti G1N, G2N, G3N, dan G4N) membentuk kelompok yang bergerombol dan berlawanan arah dengan kelompok parameter penyakit, yang menunjukkan bahwa tanpa tekanan penyakit, tanaman mampu mengekspresikan potensi agronominya secara optimal.

4.2 PEMBAHASAN

4.2.1 Ketahanan Pada Tanaman Cabai Merah Terhadap Penyakit Keriting Kuning

Berdasarkan hasil data pada Gambar 4.1 Grafik Perkembangan Penyakit Keriting Kuning, data dari minggu ke-1 hingga ke-23 setelah inokulasi menunjukkan adanya dinamika infeksi yang bervariasi. Gejala yang muncul serempak pada minggu ke-2 di seluruh perlakuan (G1I 11%, G2I 19%, G3I 18%, dan G4I 13%) menunjukkan bahwa proses inokulasi virus melalui vektor viruliferous berlangsung efektif dan replikasi awal virus di jaringan floem berjalan cepat pada seluruh genotipe uji (Widodo & Taufik, 2024). Namun, waktu tercapainya puncak keparahan yang berbeda G1I pada minggu ke-9 (73%) dan G3I pada minggu ke-11 (61%) yang jauh lebih lambat serta lebih tinggi dibandingkan G2I pada minggu ke-3 (34%) dan G4I pada minggu ke-3 - 4 (28%) yang mengindikasikan bahwa G1I dan G3I memiliki laju akumulasi virus dan ekspresi gejala yang jauh lebih persisten, sejalan dengan pola genotipe rentan yang gagal membatasi replikasi virus pada fase awal infeksi (Siddique *et al.*, 2022). Penurunan gejala pada G1I dan G3I yang kemudian berhenti (stabil) di angka 27%

dan 34% sejak minggu ke-15 mencerminkan kondisi kejenuhan gejala, yaitu jaringan tanaman yang telah terinfeksi penuh tidak lagi menunjukkan peningkatan skor keparahan meski replikasi virus tetap berlangsung, sebuah fenomena yang konsisten dengan plateau AUDPC pada genotipe rentan yang dilaporkan pada berbagai pengujian ketahanan *Capsicum* terhadap *Begomovirus* (De Lira-Ramos *et al.*, 2025).

Sebaliknya, penurunan drastis hingga mencapai 0% pada G2I sejak minggu ke-16 dan pada G4I sejak minggu ke-10 menunjukkan pola pemulihan (*recovery*) secara fenotipik, bukan sekadar kejenuhan gejala, karena tunas-tunas baru yang tumbuh setelah fase puncak tidak lagi menampilkan gejala infeksi (Sandra, 2025). Pola *recovery* semacam ini telah dilaporkan pula pada pengujian genotipe cabai koleksi PKHT IPB, di mana genotipe yang semula bergejala berat mampu menunjukkan penurunan skor gejala secara bertahap hingga tanaman tampak sehat kembali pada pengamatan akhir (Sandra *et al.*, 2022).

Perbedaan pola kurva antara genotipe yang mengalami kejenuhan gejala G1I, G3I dan genotipe yang mengalami pemulihan sempurna (G2I, G4I) dapat dijelaskan melalui mekanisme pertahanan tanaman yang bekerja pada tingkat molekuler maupun fisiologis. Pemulihan gejala pada tunas-tunas baru yang tidak terinfeksi umumnya berkaitan dengan aktivasi sistem pertahanan sistemik berbasis hormon asam salisilat dan asam jasmonat yang menekan replikasi dan penyebaran virus ke jaringan meristem yang baru terbentuk (Hou & Tsuda, 2022). Selain jalur hormonal, mekanisme pembungkaman gen berbasis RNA (*RNA silencing*) turut berperan penting dalam menekan titer virus pada genotipe yang menunjukkan pemulihan, sehingga jaringan baru yang tumbuh setelah fase puncak infeksi relatif bebas dari akumulasi virus meski tanaman induk tetap terinfeksi (Zhang *et al.*, 2023). Keberhasilan G2I dan G4I mencapai intensitas penyakit 0% pada akhir pengamatan juga mengindikasikan adanya dasar genetik ketahanan yang lebih kuat. Perbedaan puncak keparahan yang lebih rendah pada G2I dan G4I dibandingkan G1I dan G3I turut mencerminkan bahwa laju infeksi awal yang lebih terkendali berkorelasi dengan kemampuan tanaman menekan perkembangan penyakit lebih lanjut, pola yang juga teramati pada evaluasi ketahanan *Begomovirus* di lapangan menggunakan berbagai perlakuan pengendalian vektor (Widodo & Taufik, 2024).

Berdasarkan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.2 mengenai Laju Perkembangan Penyakit dan Area Under Disease Progress Curve (AUDPC) Penyakit Keriting

Kuning pada Tanaman Cabai Besar, masing-masing genotipe menunjukkan pola ketahanan yang berbeda. Pada genotipe G1I, akumulasi penyakit pada fase awal (AUDPC 1) melonjak dari 38.97 hingga 439.44 (7 hari setelah inokulasi hingga 63 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.9796, genotipe G2I mencatatkan AUDPC 1 dari 66.11 hingga 210.00 (7 hari setelah inokulasi hingga 21 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.8679. Pada genotipe G3I menunjukkan AUDPC 1 dari 81.67 hingga 373.33 (7 hari setelah inokulasi hingga 70 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.8742, dan genotipe G4I memiliki AUDPC 1 dari 54.44 hingga 194.44 (7 hari setelah inokulasi hingga 21 hari setelah inokulasi) dengan laju perkembangan 0.9749. Fase awal peningkatan AUDPC (AUDPC 1) pada seluruh genotipe inokulasi menunjukkan bahwa gejala kuning keriting mulai berkembang segera setelah inokulasi melalui vektor, sebagaimana pola umum epidemi penyakit kuning keriting cabai yang dilaporkan menyerang hampir seluruh sentra produksi cabai di Indonesia (Sandra, 2025). Laju perkembangan yang sangat tinggi pada G1I (0,9796) dan G4I (0,9749) menunjukkan laju perubahan keparahan gejala yang tinggi pada fase awal, konsisten dengan temuan bahwa akumulasi *Begomovirus* pada jaringan floem tanaman muda berlangsung eksponensial pada minggu-minggu pertama setelah inokulasi (Zhang *et al.*, 2023).

Fase penurunan G1I (AUDPC 2) turun dari 439.44 ke 191.85 (63-161 hari setelah inokulasi) dengan laju penurunan 0.6124, dengan rata-rata intensitas penyakit sebesar 31.82% yang dikategorikan Rentan, dan pada G3I menunjukkan AUDPC 2 dari 399.26 turun ke 241.11 (70-161 hari setelah inokulasi) dengan laju penurunan 0.2236, serta memiliki rata-rata intensitas penyakit tertinggi yaitu 36.26% yang dikategorikan Rentan. Hal ini yang sejalan dengan penelitian Siddique *et al.* (2022) bahwa genotipe rentan yang gagal menekan replikasi virus secara berkelanjutan sehingga AUDPC-nya tetap tinggi hingga akhir pengamatan. Terakhir, genotipe G4I memiliki nilai AUDPC 2 yang turun dari 194.44 menuju 0.00 (21-161 hari setelah inokulasi) dengan laju penurunan 0.4188, sehingga sukses mencapai rata-rata intensitas penyakit 4.65% dan dikategorikan sebagai Tahan.

Hal ini menunjukkan penurunan drastis menuju intensitas penyakit 4.65% dengan laju penurunan yang jauh lebih besar, sebuah fenomena yang secara spesifik dikenal sebagai gejala *recovery* atau pemulihan pasca-infeksi *Begomovirus* pada cabai (Sandra, 2025). Fenomena *recovery* semacam ini telah pula dilaporkan pada pengujian 19 genotipe cabai koleksi PKHT IPB, di mana

genotipe yang mula-mula menunjukkan gejala berat mampu pulih pada pengamatan hari ke-50 hingga ke-60 setelah infeksi dan kemudian dikategorikan Tahan hingga Agak Tahan (Sandra *et al.*, 2022). Perbedaan laju penurunan AUDPC 2 antargenotipe cabai akibat infeksi *Begomovirus* semacam ini juga konsisten dengan hasil pengamatan pada berbagai kultivar cabai di lapangan yang menunjukkan variasi nyata dalam kategori ketahanan berdasarkan laju perkembangan penyakit sekaligus memperkuat bahwa nilai AUDPC dan kemiringan kurvanya merupakan indikator kuantitatif yang valid untuk mengklasifikasikan tingkat ketahanan genotipe terhadap *Begomovirus*, mulai dari kategori resisten hingga sangat rentan (De Lira *et al.*, 2025).

Pada G2I dan G4I menunjukkan penurunan keparahan penyakit hingga 0% pada pengamatan akhir, hal ini konsisten dengan dengan fenomena pemulihan gejala secara fenotipik. Kemampuan G2I dan G4I menekan intensitas penyakit hingga 0% pada fase akhir pengamatan diduga terkait dengan aktivasi jalur pertahanan hormonal asam salisilat (SA) dan asam jasmonat (JA) yang berperan sebagai sinyal utama respons imun tanaman terhadap infeksi *Begomovirus* (Sandra, 2025). Interaksi antagonis maupun sinergis antara SA dan JA telah terbukti menentukan efektivitas respons pertahanan sistemik tanaman inang terhadap patogen virus, termasuk kemampuan menekan replikasi dan penyebaran virus dalam jaringan tanaman (Hou & Tsuda, 2022). Selain jalur hormonal, mekanisme gene silencing berbasis RNA interference (RNAi) turut diduga berkontribusi terhadap penurunan titer virus pada genotipe yang mengalami pemulihan, sehingga gejala kuning keriting berkurang seiring waktu meskipun tanaman tetap terinfeksi (Sandra, 2025). Temuan ini juga didukung oleh hasil pemetaan QTL yang mengidentifikasi lokus-lokus genetik spesifik yang berasosiasi dengan ketahanan terhadap *Pepper Yellow Leaf Curl Virus* pada *Capsicum annuum*, yang membuka peluang seleksi genotipe tahan berdasarkan marka molekuler (Siddique *et al.*, 2022). Perbandingan antara genotipe berkode I (inokulasi) dan N (non-inokulasi) dalam rancangan penelitian semacam ini penting untuk memastikan bahwa penurunan intensitas penyakit pada G2I dan G4I benar-benar merupakan respons pertahanan aktif terhadap infeksi *Begomovirus* dan bukan sekadar variasi pertumbuhan alami tanaman yang tidak terpapar virus, sebagaimana desain pembanding tanpa inokulasi yang lazim digunakan pada pengujian ketahanan genotipe cabai terhadap virus kuning melalui inokulasi vektor kutu kebul (Sandra *et al.*, 2022).

Mekanisme pertahanan yang mendasari perbedaan tersebut diduga melibatkan aktivasi jalur *Systemic Acquired Resistance* (SAR) melalui gen NPR1, yang telah terbukti berperan penting dalam ketahanan cabai terhadap infeksi *Begomovirus* dengan menekan titer virus pada genotipe yang membawa alel NPR1 fungsional (Ishfaq *et al.*, 2024). Efek heterosis dari persilangan interspesifik *Capsicum* juga dapat berkontribusi terhadap perbedaan respons ketahanan, sebagaimana dilaporkan pada hibrida *Capsicum frutescens* yang menunjukkan hybrid vigor untuk sifat ketahanan penyakit dibandingkan tetuanya (Amorim *et al.*, 2021). Rendahnya AUDPC pada genotipe G4I menunjukkan respons fenotipik yang konsisten dengan ketahanan yang lebih tinggi pada kondisi penelitian, sehingga genotipe ini layak dipertimbangkan sebagai materi genetik unggulan dalam seleksi lanjutan program pemuliaan cabai tahan *Begomovirus* (Kesumawati *et al.*, 2024). Nilai AUDPC ini mencerminkan seberapa cepat dan parah penyakit berkembang selama masa pengamatan, sehingga genotipe dengan nilai lebih rendah dianggap lebih tahan terhadap penyakit kuning.

4.2.2 Pertumbuhan Agronomis pada Tanaman Cabai Besar

4.2.2.1 Tinggi Tanaman Cabai Besar

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan inokulasi dan non inokulasi berpengaruh tidak nyata terhadap pertumbuhan tinggi tanaman pada umur 11 MST, tetapi berpengaruh nyata pada umur 12, 13, 14, 15, 16 MST hal ini mengindikasikan adanya periode laten sebelum dampak infeksi *Begomovirus* benar-benar termanifestasi pada pertumbuhan vegetatif tanaman cabai, sejalan dengan karakteristik biologis *Begomovirus* yang membutuhkan waktu untuk bereplikasi secara sistemik di jaringan floem sebelum gejala fisiologis tampak nyata pada organ tanaman (Helina *et al.*, 2025). Penurunan tinggi tanaman yang konsisten pada G1I dan G3I yang juga menunjukkan nilai kenaikan perkembangan penyakit tertinggi (37–58%) mencerminkan gangguan fisiologis akibat replikasi virus yang tidak terkendali, termasuk terganggunya proses fotosintesis dan metabolisme tanaman yang berdampak langsung pada perlambatan pertumbuhan vegetatif (Zhang *et al.*, 2023).

Pola ini konsisten dengan laporan bahwa *Begomovirus* dapat menekan hasil dan pertumbuhan tanaman inang hingga 70–90% pada kondisi serangan berat, terutama ketika mekanisme pertahanan tanaman tidak mampu membatasi penyebaran virus secara sistemik (Fiallo dan Navas, 2023). Sebaliknya, tinggi

tanaman G2I dan G4I yang secara konsisten tidak berbeda nyata dengan G1N dan G2N sejak 13–16 MST menunjukkan bahwa kedua genotipe ini berhasil memulihkan laju pertumbuhannya mendekati kondisi tanaman sehat non-inokulasi, sebuah indikasi kuat bahwa mekanisme *recovery* yang terjadi tidak hanya menekan gejala pada daun tetapi juga memulihkan fungsi fisiologis tanaman secara keseluruhan (Sandra, 2025). Nilai penurunan perkembangan penyakit pada G2I dan G4I yang konsisten rendah hingga 0% pada minggu-minggu akhir turut memperkuat bahwa pemulihan gejala berkorelasi langsung dengan pemulihan pertumbuhan tinggi tanaman, pola yang juga teramati pada evaluasi pengaruh pengendalian vektor *Begomovirus* terhadap pertumbuhan tinggi tanaman cabai merah besar di lapangan (Widodo & Taufik, 2024).

Perbedaan nyata pada uji Tukey antara G3I dengan nilai tinggi tanaman terendah (34,14–42,02 cm) dibandingkan G1N dan genotipe *recovery* lainnya sepanjang 12–16 MST menegaskan bahwa kerentanan genetik yang tinggi berdampak kumulatif terhadap penekanan pertumbuhan tanaman seiring bertambahnya umur pengamatan, bukan hanya efek sesaat pada satu titik waktu (Widodo & Taufik, 2024). Kondisi ini secara mekanistik dapat dijelaskan melalui aktivasi jalur *Systemic Acquired Resistance* (SAR) yang melibatkan gen NPR1, di mana genotipe dengan ekspresi NPR1 yang lebih efektif mampu menekan titer virus sehingga dampak negatifnya terhadap pertumbuhan tanaman menjadi minimal, sementara genotipe rentan tidak mampu mengaktifkan jalur pertahanan tersebut secara optimal (Ishfaqe *et al.*, 2024). Kemampuan G2I dan G4I mencapai tinggi tanaman yang setara dengan kontrol non-inokulasi juga mengindikasikan adanya dasar genetik ketahanan yang kuat, sebagaimana ditemukan pada pemetaan QTL yang mengidentifikasi lokus-lokus spesifik yang berasosiasi dengan resistensi terhadap Pepper yellow leaf curl virus pada *Capsicum annuum* (Siddique *et al.*, 2022).

4.2.2.2 Diameter Batang Tanaman Cabai Besar

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan inokulasi dan non inokulasi berpengaruh tidak nyata terhadap pertumbuhan diameter batang pada umur 11, 14, 15, dan 16 MST, tetapi berpengaruh nyata pada umur 12 dan 13 MST. Tidak adanya perbedaan nyata pada 11 MST mengindikasikan bahwa proses replikasi virus pada fase tersebut belum cukup mengganggu alokasi asimilat ke jaringan kambium batang, sejalan dengan karakteristik *Begomovirus* yang membutuhkan waktu inkubasi sebelum

menimbulkan gangguan fisiologis sistemik pada tanaman inang (Fiallo dan Navas, 2023). Munculnya perbedaan nyata pada 12 dan 13 MST, di mana G4I justru menunjukkan diameter batang tertinggi meskipun berstatus inokulasi, mengindikasikan bahwa genotipe ini memiliki mekanisme pertahanan yang efektif menekan dampak virus terhadap pertumbuhan vegetatif sejak awal infeksi, konsisten dengan rendahnya nilai perkembangan penyakit pada G4I (13% dan 1%) yang mencerminkan kategori tahan (Sandra, 2025). Keunggulan diameter batang G4I dibandingkan bahkan dengan kontrol non-inokulasi G3N dan G4N pada periode tersebut dapat dijelaskan melalui aktivasi jalur *Systemic Acquired Resistance* berbasis gen NPR1 yang tidak hanya menekan titer virus tetapi juga mendukung alokasi sumber daya metabolik yang lebih efisien untuk pertumbuhan jaringan vaskular tanaman (Ishfaqe *et al.*, 2024). Fenomena ini memperkuat bahwa genotipe dengan dasar genetik ketahanan yang kuat mampu mempertahankan, bahkan pada beberapa kasus meningkatkan, kapasitas pertumbuhan vegetatifnya meskipun berada dalam kondisi tertekan oleh serangan patogen (Siddique *et al.*, 2022).

Hilangnya perbedaan nyata antarperlakuan pada 14 hingga 16 MST menunjukkan bahwa diameter batang secara umum bersifat lebih stabil dan kurang sensitif terhadap tekanan infeksi virus dibandingkan tinggi tanaman pada fase pertumbuhan lanjut, kemungkinan karena prioritas alokasi asimilat pada tanaman yang telah mapan lebih diarahkan untuk mempertahankan struktur penopang utama batang dibandingkan pemanjangan aktif (Zhang *et al.*, 2023). Namun demikian, pengecualian tetap terlihat pada G3I yang mempertahankan diameter batang terendah (5,82 mm) bersamaan dengan nilai puncak perkembangan penyakit tertinggi (61%), menunjukkan bahwa pada genotipe yang benar-benar rentan, gangguan fisiologis akibat replikasi virus yang tidak terkendali tetap berdampak signifikan terhadap pertumbuhan radial batang meskipun secara statistik tidak lagi berbeda nyata dengan perlakuan lain akibat tingginya variasi data pada fase akhir pengamatan (Widodo & Taufik, 2024). Konsistensi rendahnya nilai perkembangan penyakit pada G1I, G2I, dan G4I (35%, 11%, dan 0%) yang berbanding lurus dengan diameter batang yang relatif lebih baik dibandingkan G3I menegaskan bahwa mekanisme pemulihan (*recovery*) yang terjadi pada genotipe tahan turut berkontribusi terhadap pemulihan kapasitas pertumbuhan sekunder batang, tidak hanya menekan gejala pada organ daun (Sandra, 2025). Dengan demikian, data diameter batang ini melengkapi data tinggi tanaman dan AUDPC

sebelumnya untuk memperkuat kesimpulan bahwa G4I dan G2I merupakan genotipe dengan ketahanan terbaik yang mampu mempertahankan pertumbuhan vegetatif secara menyeluruh, sementara G3I tetap menunjukkan karakteristik genotipe rentan pada seluruh parameter pertumbuhan yang diamati (Helina *et al.*, 2025).

4.2.2.3 Panjang Internode Tanaman Cabai Besar

Berdasarkan hasil uji lanjut Tukey taraf 5% (Tabel 4.4) menunjukkan pengaruh nyata pada 15 dan 16 MST, tetapi tidak berbeda nyata pada 11, 12, 13, 14 MST sejalan dengan penelitian Gupta *et al.*, (2021) bahwa karakteristik gejala pemendekan ruas batang akibat infeksi *Begomovirus* yang membutuhkan waktu untuk terekspresi secara fisiologis, karena *Geminivirus* mengubah profil ekspresi gen inang dan jalur pensinyalan sel yang bermanifestasi sebagai gejala keriting daun, pembengkakan tulang daun, klorosis, hambatan pertumbuhan, pembengkokan batang, dan pengecilan ukuran organ tanaman, sehingga dampaknya terhadap elongasi ruas batang baru terlihat setelah tanaman melewati fase vegetatif awal. Keterlambatan munculnya perbedaan nyata ini juga berkaitan dengan mekanisme molekuler spesifik, karena protein C4 yang dikode *Geminivirus* dapat menghambat jalur pensinyalan giberelin dengan mencegah degradasi protein DELLA NbGAI, sehingga jalur giberelin terblokir dan tanaman terinfeksi menampilkan gejala kerdil serta perkembangan bunga yang tidak normal (Li *et al.*, 2022), dan mengingat giberelin merupakan hormon utama pengendali elongasi ruas batang, gangguan pada jalur ini baru berdampak nyata terhadap panjang internode setelah akumulasi virus mencapai konsentrasi yang cukup tinggi pada fase pertumbuhan lanjut, yakni pada 15–16 MST. Selain itu, menurut Suprayogi *et al.* (2025) periode munculnya perbedaan nyata ini bertepatan dengan masuknya tanaman ke fase generatif, sehingga sejalan dengan temuan bahwa dampak penyakit daun keriting kuning terhadap parameter pertumbuhan tanaman cabai berbeda intensitasnya antara fase vegetatif dan fase generatif.

Menariknya, pada 15 dan 16 MST perbedaan nyata yang muncul tidak sepenuhnya memisahkan kelompok inokulasi dari non-inokulasi, karena G2I tidak berbeda nyata dengan G2N dan G3I juga tidak berbeda nyata dengan G3N, sehingga variasi panjang internode tampak lebih dikendalikan oleh faktor genetik bawaan genotipe dibandingkan status inokulasi kutu kebul semata. Hal ini konsisten dengan konsep Sandra *et al.*, (2025) bahwa respons tanaman terhadap *Begomovirus* sangat bergantung pada latar belakang genetik masing-masing

genotipe, sebagaimana genotipe cabai tertentu dapat dikategorikan tahan karena memiliki intensitas serangan kutu kebul yang jauh lebih rendah dibandingkan genotipe lain, sehingga genotipe G2 kemungkinan memiliki karakter arsitektur batang dengan ruas yang secara alami lebih panjang serta tingkat toleransi terhadap gangguan jalur giberelin yang lebih baik, sementara genotipe G3 secara konsisten menghasilkan ruas terpendek baik pada kondisi inokulasi maupun non-inokulasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemendekan ruas pada genotipe rentan terhadap gangguan hormonal akibat virus kemungkinan tumpang tindih dengan karakter genetik dasar genotipe tersebut, sehingga pemahaman mengenai strategi pemuliaan dan pengelolaan *Begomovirus* pada cabai perlu mempertimbangkan variasi genetik arsitektur tanaman selain sekadar ketahanan terhadap gejala penyakit (Nalla *et al.*, 2023) untuk menghasilkan genotipe yang tetap mempertahankan elongasi ruas batang normal meskipun berada di bawah tekanan infeksi.

4.2.2.4 Rata-rata Jumlah Cabang Tanaman Cabai Besar

Berdasarkan hasil *Analysis of Variance* (ANOVA) dan Uji Lanjut Tukey taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan berpengaruh tidak nyata terhadap pertumbuhan jumlah cabang pada umur 6 – 12 MST, tetapi berbeda nyata pada 11 hingga 16 MST, dengan seluruh perlakuan non-inokulasi (G1N, G2N, G3N, G4N) secara sistematis unggul dibandingkan seluruh perlakuan inokulasi (G1I, G2I, G3I, G4I) mengindikasikan bahwa pembentukan cabang lebih sensitif terhadap gangguan akibat aktivitas makan kutu kebul dan infeksi *Begomovirus* dibandingkan parameter pertumbuhan vertikal, karena interaksi antara *Bemisia tabaci* dan tanaman inang melibatkan komponen saliva serta sinyal elektrik dan hidrolik yang secara berkelanjutan memodulasi mekanisme pertahanan tanaman selama seluruh fase makan serangga (Naalden *et al.*, 2021), sehingga tekanan terhadap fisiologi tanaman berlangsung terus-menerus dan tidak hanya bersifat sesaat seperti pada fase kritis pertumbuhan tinggi atau diameter batang.

Gangguan yang bersifat kontinu ini juga berkaitan dengan intervensi virus terhadap jalur hormon yang mengendalikan perkembangan tunas lateral, karena berbagai fitohormon seperti asam salisilat, asam jasmonat, etilen, auksin, sitokinin, giberelin, brasinosteroid, dan asam absisat diketahui terlibat dalam interaksi tanaman dengan *Geminivirus*, dengan gen-gen pada jalur auksin dan asam jasmonat mengalami regulasi berbeda akibat infeksi *Geminivirus* (Zhang *et al.*, 2023). Selain faktor virus, kerusakan langsung akibat aktivitas makan kutu kebul

turut berkontribusi terhadap rendahnya jumlah cabang pada seluruh perlakuan inokulasi, karena kutu kebul secara langsung merugikan tanaman melalui sekresi zat manis saat makan yang menyebabkan penutupan stomata, pembentukan pigmen antosianin, dan gugurnya daun, yang secara bersama-sama menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil panen (Rini *et al.*, 2025), sehingga pasokan asimilat untuk pembentukan tunas cabang baru ikut berkurang terlepas dari status ketahanan genotipe terhadap gejala virus.

Rendahnya jumlah cabang pada seluruh genotipe inokulasi dibandingkan genotipe non-inokulasi pada setiap umur pengamatan mengindikasikan bahwa infeksi virus mengganggu keseimbangan hormonal auksin dan sitokinin yang mengatur dominansi apikal dan pertumbuhan tunas lateral, sehingga menghambat pembentukan cabang baru terlepas dari status ketahanan genotipe (Zhang *et al.*, 2023). Pola ini konsisten dengan konsep *growth-defence trade-off*, di mana tanaman yang mengalokasikan sumber daya metabolik untuk mengaktifkan respons pertahanan terhadap patogen secara alami mengalami penurunan laju pertumbuhan vegetatif, termasuk pembentukan cabang baru (Derbyshire *et al.*, 2024). Menariknya, meskipun G2I dan G4I menunjukkan nilai perkembangan penyakit yang rendah hingga 0% dan berhasil menyamai kontrol non-inokulasi pada parameter tinggi tanaman serta panjang internode, kedua genotipe ini tetap menunjukkan jumlah cabang yang jauh lebih rendah dibandingkan G2N dan G4N, menegaskan bahwa biaya metabolik dari aktivasi mekanisme pertahanan tetap memberikan penalti pertumbuhan pada organ percabangan meskipun gejala penyakit berhasil ditekan (Gao *et al.*, 2024).

Perbedaan mencolok antara G2N yang secara konsisten memberikan nilai jumlah cabang tertinggi (17,11 – 28,89 cm) dengan seluruh genotipe inokulasi memperkuat bukti bahwa keberadaan virus, sekalipun pada genotipe yang secara fenotipik tergolong tahan, tetap membutuhkan aktivasi jalur pertahanan sistemik yang bersifat energik dan menyita sumber daya yang seharusnya dialokasikan untuk pertumbuhan meristem aksiler (Ishfaqe *et al.*, 2024). Pola jumlah cabang yang tetap rendah secara konsisten pada G3I di seluruh periode pengamatan, sejalan dengan tingginya nilai perkembangan penyakit genotipe tersebut, menunjukkan bahwa pada genotipe rentan, penekanan percabangan terjadi akibat kombinasi antara kerusakan fisiologis langsung oleh replikasi virus dan gangguan translokasi asimilat, bukan semata biaya pertahanan (Fiallo dan Navas, 2023). Ditariknya G1I dari kategori sangat rentan pada minggu-minggu awal menuju

penurunan nilai perkembangan penyakit di akhir pengamatan turut diikuti oleh sedikit perbaikan jumlah cabang, meski tetap jauh di bawah kontrol non-inokulasinya, menegaskan bahwa pemulihan gejala penyakit tidak serta-merta memulihkan penuh kapasitas percabangan tanaman dalam rentang waktu pengamatan yang tersedia (Sandra, 2025). Dengan demikian, data jumlah cabang ini memberikan perspektif penting bahwa evaluasi ketahanan genotipe cabai terhadap *Begomovirus* perlu mempertimbangkan tidak hanya penekanan gejala visual dan AUDPC, tetapi juga potensi *trade-off* antara pertahanan dan produktivitas vegetatif yang berkorelasi langsung dengan potensi hasil panen di lapangan (Derbyshire *et al.*, 2024).

4.2.2.5 Jumlah Cabang, Total Bunga, Jumlah Buah, Umur Bunga dan % Buah Jadi

Berdasarkan data dari Tabel 4.6 Korelasi terbalik yang sangat kuat antara nilai AUDPC dengan jumlah cabang, bunga, dan buah pada penelitian ini menegaskan bahwa AUDPC bukan hanya indikator keparahan gejala visual, tetapi juga prediktor kuantitatif yang andal untuk memperkirakan penurunan komponen hasil akibat infeksi *Begomovirus* (Kesumawati *et al.*, 2024). Nilai AUDPC yang mencerminkan akumulasi keparahan dan laju perkembangan penyakit kuning keriting dari waktu ke waktu terbukti berkorelasi negatif yang sangat erat terhadap parameter agronomi reproduktif tanaman cabai, sejalan dengan temuan bahwa total hasil panen berkorelasi negatif dengan insidensi dan keparahan penyakit virus, dengan tingkat penurunan hasil masing-masing mencapai 74,2% dan 95,7% pada kondisi tanpa pengendalian (Aurin & Begum, 2024). Perbandingan antargenotipe pada kelompok inokulasi menunjukkan bahwa tekanan penyakit pada fase awal (AUDPC 1) secara nyata membatasi pembentukan cabang dan bunga, sebagaimana terlihat pada G2I dan G4I yang hanya menghasilkan 3 dan 3,7 cabang serta 0 bunga pada fase awal akibat replikasi virus yang masih dini pada jaringan muda, sejalan dengan temuan bahwa infeksi *Begomovirus* pada stadia vegetatif awal cenderung menghambat pertumbuhan tunas karena virus memanfaatkan sumber daya fotosintat tanaman untuk replikasinya (Sipriyadi *et al.*, 2022). Sebaliknya, G1I dan G3I yang memiliki nilai AUDPC 1 jauh lebih tinggi (15.049,62 dan 19.804,17) justru mencatatkan jumlah cabang dan bunga awal yang lebih besar, mengindikasikan bahwa tekanan penyakit pada fase ini tidak serta-merta menekan pertumbuhan vegetatif awal, melainkan baru berdampak nyata pada efisiensi pembentukan buah di fase berikutnya, pola yang juga dilaporkan pada tomat terinfeksi *Begomovirus* di mana penurunan hasil panen

umumnya lebih terlihat pada fase generatif lanjut dibandingkan fase vegetatif awal (Tatineni & Hein, 2023).

Nilai AUDPC 2 yang tinggi pada G1I (20.425,74) dan G3I (20.779,6) menunjukkan bahwa proses pemulihan atau *recovery* fenotipik pada kedua genotipe tersebut berjalan lambat dan tidak tuntas, sehingga beban penyakit yang masih tersisa pada fase penurunan tetap besar dan berdampak langsung pada rendahnya persentase buah jadi masing-masing sebesar 35% dan 28%, sejalan dengan temuan bahwa genotipe cabai yang mengalami *recovery* tidak sempurna cenderung tetap menunjukkan gejala residual seperti daun kuning-keriting ringan hingga fase generatif akhir yang mengganggu efisiensi fotosintesis dan alokasi asimilat ke organ reproduktif (Sandra, 2025). Sebaliknya, G4I dengan AUDPC 2 terendah (1.810,28) mengindikasikan proses *recovery* yang paling optimal di antara seluruh genotipe inokulasi, ditandai dengan penurunan gejala yang tajam setelah puncak infeksi sehingga tanaman mampu mengalihkan kembali sumber daya metaboliknya untuk pembentukan bunga dan buah, tercermin dari jumlah buah tertinggi (294) dan persentase buah jadi tertinggi (82%) yang bahkan mendekati performa kontrol non-inokulasinya (Rout *et al.*, 2025). Pola ini konsisten dengan mekanisme pemulihan pada tanaman yang terinfeksi *Begomovirus*, yang diduga melibatkan aktivasi respons pertahanan seperti *gene silencing* terhadap genom virus serta peningkatan hormon pertahanan yang membatasi penyebaran virus secara sistemik sehingga jaringan baru yang terbentuk relatif bebas dari gejala (Sandra, 2025). Pada G2I, AUDPC 2 yang berada pada level menengah (7.830,93) turut diiringi oleh proses pemulihan yang cukup baik dari sisi vegetatif dan pembungaan, terlihat dari lonjakan jumlah cabang (82,78) dan bunga (447) yang jauh melampaui genotipe lain, namun proses *recovery* tersebut belum sepenuhnya mendukung keberhasilan pembuahan karena persentase buah jadinya hanya 32%, menunjukkan bahwa pemulihan fenotipik pada organ vegetatif tidak selalu berbanding lurus dengan pemulihan kapasitas reproduktif tanaman (Tatineni & Hein, 2023). Perbandingan menyeluruh keempat genotipe inokulasi ini memperlihatkan bahwa besaran AUDPC 2 dapat dijadikan indikator kuantitatif tingkat keberhasilan *recovery* fenotipik pascainfeksi, di mana semakin rendah nilainya semakin baik kapasitas tanaman memulihkan pertumbuhan generatifnya (Kumar *et al.*, 2023).

Perbandingan antara kelompok inokulasi dan non-inokulasi menegaskan besarnya dampak *Begomovirus* terhadap potensi produksi tanaman cabai, di

mana seluruh genotipe non-inokulasi G1N, G2N, G3N, dan G4N mampu menghasilkan ratusan hingga lebih dari seribu cabang serta ratusan bunga dan buah tanpa hambatan berarti, jauh melampaui capaian genotipe inokulasi meskipun beberapa di antaranya seperti G4I menunjukkan performa relatif baik, sejalan dengan laporan bahwa penyakit yang disebabkan oleh *Begomovirus* dapat menekan produktivitas tanaman inang hingga mendekati 100% pada kultivar yang rentan (Tatineni & Hein, 2023). Rendahnya persentase buah jadi pada seluruh genotipe inokulasi dibandingkan kontrolnya, termasuk pada G3I yang hanya mencapai 28% berbanding 71% pada G3N, memperlihatkan bahwa infeksi virus tidak hanya menekan jumlah organ generatif yang terbentuk, tetapi juga menurunkan efisiensi konversi bunga menjadi buah secara signifikan, sebagaimana dilaporkan pada berbagai kajian bahwa penyakit virus tular vektor secara konsisten menurunkan kualitas maupun kuantitas hasil panen tanaman hortikultura (Shahriari *et al.*, 2023). Perbedaan besaran penurunan produksi antargenotipe inokulasi terhadap kontrolnya juga mengonfirmasi adanya variasi ketahanan genetik, di mana G4I yang memiliki AUDPC 2 terendah menunjukkan penurunan produksi paling kecil relatif terhadap G4N dibandingkan genotipe lainnya, memperkuat argumen bahwa nilai AUDPC dapat digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk memprediksi besarnya kehilangan hasil akibat infeksi *Begomovirus* pada berbagai genotipe cabai (Rout *et al.*, 2025). Dengan demikian, data pertumbuhan cabang, bunga, buah, dan persentase buah jadi pada kelompok inokulasi dibandingkan non-inokulasi memberikan gambaran komprehensif mengenai dampak fisiologis *Begomovirus* terhadap kapasitas produksi cabai besar, sekaligus menegaskan pentingnya seleksi genotipe dengan pola AUDPC rendah dan kapasitas pemulihan tinggi seperti G4I dan G2I dalam program pemuliaan ketahanan cabai terhadap penyakit kuning keriting di Indonesia (Sipriyadi *et al.*, 2022).

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 4.7 analisis ragam (ANOVA) taraf 5% menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi nyata antara kombinasi genotipe dan perlakuan inokulasi terhadap parameter umur awal berbunga tanaman Cabai Besar (*Capsicum annuum*). Meskipun secara statistik dinilai tidak berinteraksi nyata akibat tingginya plastisitas dan variabilitas genetik individu tanaman di lapangan, fluktuasi angka rerata secara deskriptif menunjukkan kecenderungan transisi fase generatif yang berkorelasi kuat dengan tingkat keparahan penyakit, laju infeksi semu (R), dan skor AUDPC. Hal ini disebabkan

karena adanya keragaman respons individu tanaman terhadap infeksi *Begomovirus*, di mana tingkat keparahan penyakit yang dialami tiap tanaman sangat bervariasi bahkan dalam genotipe yang sama, sebagaimana dilaporkan bahwa tanaman dengan tingkat keparahan penyakit yang lebih berat cenderung berbunga lebih cepat dibandingkan tanaman yang bergejala ringan (Andarwening *et al.*, 2022). Variabilitas keparahan gejala inilah yang membuat efek perlakuan inokulasi terhadap umur berbunga menjadi tidak konsisten arahnya (ada yang lebih cepat, ada yang lebih lambat), sehingga secara statistik efek rata-rata perlakuan menjadi kabur dan tidak terdeteksi sebagai interaksi yang nyata (Andarwening *et al.*, 2022). Sejalan dengan penelitian Siddique *et al.*, (2022) menegaskan bahwa dengan adanya gangguan fisiologis akibat infeksi *Begomovirus* yang mengalihkan sumber daya metabolik tanaman untuk replikasi virus dan respons pertahanan, sehingga menghambat proses transisi ke fase generatif, sejalan dengan laporan bahwa infeksi PepYLCV dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman yang terhambat serta gangguan pada perkembangan organ reproduktif seperti kuncup bunga.

4.2.2.6 Jumlah Buah per tanaman, Berat rata-rata per Buah (Gram), dan Berat Total Buah per tanaman (Gram)

Berdasarkan Tabel 4.7 dan Tabel Skor AUDPC, performa bobot buah pada setiap genotipe menunjukkan hubungan yang erat antara tingkat keparahan penyakit dan jumlah buah per tanaman, berat 1 buah, serta berat buah total. Perlakuan G1I yang memiliki skor AUDPC sangat tinggi sebesar 35.475,36 sehingga pada parameter jumlah buah per tanaman 19 buah yang berdampak pada sangat kecilnya berat 1 buah (0,63 gram) serta rendahnya berat buah total (11,97 gram), sementara pada perlakuan G1N performanya meningkat dengan berat buah total 274,89 gram. Tingginya skor AUDPC pada G1I (35.475,36) yang diikuti oleh penyusutan jumlah buah per tanaman, berat 1 buah, dan berat buah total dibandingkan G1N sejalan dengan temuan bahwa penilaian keparahan gejala virus pada *Capsicum frutescens* berbasis indeks vegetasi maupun pengamatan visual di lapangan terbukti lebih akurat dalam mengestimasi bobot buah cabai, dengan koefisien regresi positif dan nilai R² di atas 0,90 (Taufik *et al.*, 2023), yang menegaskan bahwa keparahan penyakit dan bobot buah memang berkorelasi kuat secara kuantitatif. Kondisi serupa pada G1I dan G2I juga konsisten dengan mekanisme infeksi *Begomovirus* penyebab penyakit kuning cabai, karena infeksi *Pepper Yellow Leaf Curl Virus* (PepYLCV) yang ditularkan melalui vektor kutu kebul menimbulkan gejala cupping dan deformasi daun disertai pertumbuhan

tanaman yang kerdil serta pengecilan ukuran buah (Siddique *et al.*, 2022), sehingga menjelaskan mengapa berat 1 buah pada G1I turun drastis menjadi hanya 0,74 gram.

Perbedaan nyata AUDPC antar-genotipe seperti yang terlihat antara G1I dan G2I juga lazim ditemukan pada pengujian ketahanan cabai terhadap virus lain, di mana kultivar rentan mempertahankan nilai AUDPC tertinggi sebagai konfirmasi kerentanannya terhadap penyakit, berbeda nyata dengan genotipe tahan (Da Costa *et al.*, 2021), yang memperkuat pola bahwa AUDPC tinggi identik dengan performa bobot buah yang rendah. Selain itu, hubungan antara keparahan penyakit dan komponen hasil panen pada G2I dengan AUDPC 11.465,09 sejalan dengan pendekatan pemuliaan ketahanan penyakit pada cabai, mengingat heritabilitas arti sempit dihitung untuk insidensi dan keparahan penyakit beserta sejumlah sifat agronomi termasuk berat buah, jumlah buah, dan hasil buah per tanaman (Wahyono *et al.*, 2026), yang menunjukkan bahwa tingkat keparahan penyakit dan bobot buah merupakan sifat yang saling terkait secara genetik pada tanaman cabai. Berbeda dengan G1 dan G2, perlakuan G3I dan terutama G4I dengan AUDPC terendah justru menunjukkan performa bobot buah yang jauh lebih baik bahkan mendekati performa non-inokulasi, pola yang sejalan dengan hubungan terbalik antara keparahan gejala virus dan bobot buah sebagaimana metode penilaian berbasis indeks vegetasi NDVI terbukti akurat mengestimasi bobot buah cabai karena nilai keparahan gejala yang rendah berasosiasi dengan bobot buah yang lebih tinggi (Taufik *et al.*, 2023).

Variasi respons antar-genotipe semacam ini turut dikonfirmasi pada pengujian ketahanan *Begomovirus* pada berbagai genotipe cabai, yang melaporkan rentang keparahan penyakit yang sangat lebar antar-genotipe, mulai dari genotipe paling tahan dengan keparahan penyakit hanya 5,19% hingga genotipe paling rentan dengan keparahan penyakit mencapai 88,15% (Sandra, 2025) sejalan dengan rentang AUDPC yang jauh berbeda antara G4I dan G1I dalam penelitian ini. Menurut Jeger (2023), dampak inokulasi kutu kebul terekspresi nyata pada saat fase generatif karena toleransi terhadap penyakit virus tanaman. gejala *Begomovirus* yang bermanifestasi progresif, karena *Geminivirus* memanipulasi ekspresi gen, pensinyalan sel, dan pemrograman ulang metabolisme tanaman yang pada akhirnya menimbulkan gejala seperti hambatan pertumbuhan dan gangguan perkembangan organ tanaman termasuk organ

reproduktif, sehingga baru terlihat nyata setelah beban virus terakumulasi cukup tinggi pada fase pertumbuhan akhir.

Konsistensi performa G4I yang tetap tinggi dan mendekati nilai G4N juga sejalan dengan prinsip pemuliaan ketahanan penyakit pada cabai, karena heritabilitas arti sempit untuk insidensi dan keparahan penyakit beserta sifat agronomi termasuk berat buah, jumlah buah, dan hasil buah per tanaman dapat diestimasi bersama-sama dalam program pemuliaan ketahanan (Wahyono *et al.*, 2026), mengindikasikan bahwa genotipe dengan AUDPC rendah cenderung mewariskan kestabilan komponen bobot buah meski dalam kondisi inokulasi. Kestabilan bobot buah pada genotipe tahan seperti G4 turut sejalan dengan temuan bahwa tingkat keparahan gejala *Begomovirus* yang rendah berasosiasi dengan minimnya deformasi daun dan pengecilan ukuran buah pada tanaman terinfeksi (Siddique *et al.*, 2022), sehingga genotipe dengan AUDPC rendah dapat mempertahankan pengisian dan pembesaran buah secara lebih optimal. Pola ini juga relevan dengan hasil pemuliaan pada spesies *Capsicum* lain, di mana seleksi galur rekombinan yang menggabungkan ketahanan terhadap virus kuning/mosaik dengan performa agronomi yang baik berhasil mengidentifikasi genotipe kandidat kultivar baru yang unggul (da Costa *et al.*, 2021).

4.2.3 Nilai Heritabilitas Tanaman Cabai Besar

Berdasarkan dari hasil perhitungan nilai heritabilitas (Tabel 4.8) pada tinggi tanaman, dan jumlah cabang dapat dilihat dari awal pengamatan hingga akhir memiliki nilai yang naik signifikan pada masing-masing pengamatan per-minggu yakni dengan kriteria Tinggi yang dikendalikan oleh faktor genetik daripada faktor lingkungan dimana tinggi tanaman berkisar antara 0,51–0,75 dan jumlah cabang berkisar antara 0,71–0,87. Tingginya nilai heritabilitas pada karakter tinggi tanaman dan jumlah cabang yang tetap terjaga di tengah tekanan penyakit daun keriting kuning sejalan dengan temuan bahwa nilai heritabilitas, koefisien keragaman genotipe, dan koefisien keragaman fenotipe pada pengujian cabai yang terinfeksi virus daun keriting kuning umumnya tergolong tinggi, berkisar 65,16–99,12% untuk heritabilitas (Sayekti *et al.*, 2021). Kondisi ini juga konsisten dengan hasil pengujian hibrida cabai untuk ketahanan terhadap *Begomovirus* penyebab penyakit daun keriting kuning, yang menunjukkan bahwa nilai heritabilitas dalam arti luas maupun sempit untuk seluruh karakter yang diamati tergolong sedang hingga tinggi (Ganefianti *et al.*, 2017), sehingga karakter

vegetatif seperti tinggi tanaman dan jumlah cabang pada G1I, G2I, G3I, dan G4I tetap dapat dipertahankan meskipun berada dalam tekanan infeksi.

Hal ini selaras pula dengan klasifikasi gejala penyakit keriting kuning cabai, di mana pada tingkat keparahan ringan hingga sedang, ukuran daun, jumlah cabang, dan tinggi tanaman tidak berbeda nyata dengan tanaman sehat, dan baru mengalami penurunan jumlah cabang serta kekerdilan pada tingkat keparahan berat hingga sangat berat (Sulandari *et al.*, 2006). Sejalan dengan prinsip bahwa fenotipe suatu karakter akan semakin mencerminkan potensi genetik sesungguhnya seiring bertambahnya umur tanaman menuju fase dewasa, sehingga seleksi fenotipe langsung menjadi semakin efektif dilakukan pada tahap tersebut karena ekspresi fenotipe yang tampak pada tanaman sudah mencerminkan potensi genetiknya, sehingga seleksi fenotipik langsung berpeluang besar menghasilkan kemajuan genetik yang nyata (Hakim *et al.*, 2026). Hal berbeda terjadi pada parameter umur bunga yang memiliki nilai konsisten sebesar 0,04 dari minggu ke-11 hingga ke-16, sehingga dikategorikan dalam kriteria Rendah yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan tekanan stres biotik infeksi virus, bukan semata-mata faktor genetik. Sejalan dengan penelitian Siddique *et al.*, (2022) menegaskan bahwa infeksi *Pepper Yellow Leaf Curl Virus* (PepYLCV) dapat menghambat perkembangan pollen dan memicu kerontokan kuncup bunga secara masif hingga menyebabkan kegagalan pembentukan buah pada tingkat infeksi berat yang menyebabkan karakter generatif seperti umur bunga jauh lebih rentan terhadap tekanan biotik virus dibandingkan karakter vegetatif, sehingga kriteria rendah pada karakter ini lebih mencerminkan dominasi ragam lingkungan/patogen daripada ragam genetik.

Pada parameter diameter batang dan panjang internode nilai heritabilitas menunjukkan adanya peningkatan yang sangat dinamis dari minggu ke-11 hingga minggu ke-16 setelah tanam. Pada minggu ke-11 dan ke-12, nilai heritabilitas berada di angka 0,31 dan 0,42 yang masuk dalam kriteria Sedang. Peningkatan drastis terjadi pada minggu ke-13, di mana nilai heritabilitas mencapai angka maksimal yaitu 1,00 dengan kriteria Tinggi. Lonjakan ekstrem heritabilitas diameter batang pada minggu ke-13 dapat dipahami melalui temuan bahwa pada populasi F2 hasil hibridisasi cabai rawit, ragam genetik pada karakter agronomi seperti diameter batang, tinggi tanaman, dan lebar tajuk dapat menjadi jauh lebih dominan dibandingkan ragam lingkungan pada fase pertumbuhan tertentu, dengan seleksi yang efektif dilakukan pada karakter berheritabilitas tinggi ($h^2bs > 50\%$) (Hakim *et*

al., 2026). Namun, memasuki minggu ke-14, angka ini turun kembali ke 0,32 dengan kriteria Sedang, dan terus merosot tajam pada fase akhir pengamatan menjadi 0,12 pada minggu ke-15 hingga menyentuh angka terendah 0,03 pada minggu ke-16 (kriteria Rendah) yang dipengaruhi oleh pembengkakan akibat keparahan infeksi atau fisiologi penuaan jaringan. Hal ini mengindikasikan bahwa infeksi *Begomovirus* penyebab penyakit kuning keriting menimbulkan gejala kekerdilan dan deformasi jaringan tanaman yang meningkat seiring bertambahnya umur infeksi (Siddique *et al.*, 2022), sehingga variasi diameter batang pada fase akhir lebih dipengaruhi oleh keparahan infeksi pada G1I, G2I, G3I, dan G4I daripada potensi genetiknya.

Sementara itu, pada panjang internode, nilai heritabilitas menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya umur tanaman. Pada minggu ke-11 hingga ke-14, nilainya secara konsisten masuk ke dalam kriteria Rendah (berkisar antara 0,05–0,18). Hal ini diduga terjadi karena pada periode tersebut gejala klinis akibat infeksi *Begomovirus*, seperti penebalan tulang daun disertai pemendekan ruas dan tangkai daun, masih berlangsung secara dinamis dan sangat dipengaruhi oleh intensitas serangan vektor kutukebul serta kondisi lingkungan mikro pertanaman, sehingga ragam lingkungan mendominasi ragam genetik pada karakter ini. Kondisi ini diperkuat oleh laporan bahwa gejala kerdil pada tanaman cabai yang terinfeksi *Pepper Yellow Leaf Curl Virus* (PepYLCV) secara visual ditandai dengan memendeknya ruas antarcabang, di samping mosaik kuning-hijau dan daun yang menggulung atau melengkung (Hamdayanty & Hardina, 2023), sehingga pada genotipe G1I, G2I, G3I, dan G4I variasi panjang internode antarindividu pada fase awal lebih banyak disebabkan oleh perbedaan derajat keparahan infeksi dibandingkan oleh perbedaan susunan genetik antar tanaman. Namun, pada minggu ke-15 dan ke-16, nilainya mengalami peningkatan signifikan menjadi 0,50 dan 0,45 yang membuat statusnya naik kelas ke dalam kriteria Sedang. Dimana seleksi terhadap panjang internode tidak responsif pada awal pertumbuhan karena dominasi pengaruh lingkungan, tetapi dapat dipertimbangkan pada fase generatif akhir saat kontribusi genetik mulai mengekspresikan ketahanan tanaman terhadap pemendekan ruas. Hal ini konsisten dengan prinsip bahwa seleksi terhadap suatu karakter agronomi akan efektif dilakukan apabila karakter tersebut memiliki nilai heritabilitas yang tergolong tinggi, sebagai penanda dominannya ragam genetik dibandingkan ragam lingkungan (Hakim *et al.*, 2026), sehingga pada minggu-minggu akhir pengamatan, ketika nilai heritabilitas panjang internode mulai naik ke

kategori sedang, karakter ini mulai relevan sebagai kriteria seleksi meskipun belum sekuat karakter vegetatif lain seperti tinggi tanaman atau jumlah cabang.

Parameter jumlah bunga menunjukkan pola fluktuasi dari minggu ke-11 hingga minggu ke-16. Pada minggu ke-11 dan ke-12, heritabilitas tercatat sebesar 0,27 dan 0,31 kriteria Sedang, lalu merosot tajam pada minggu ke-13 (0,07) dan minggu ke-14 (-0,11) ke kriteria Rendah akibat puncak timbulnya gejala penyakit yang memicu kerontokan bunga secara acak. Nilai heritabilitas kembali merangkak naik pada minggu ke-15 (0,33) dan mencapai puncaknya di minggu ke-16 sebesar 0,41 kriteria Sedang yang dipengaruhi oleh fluktuasi lingkungan/stres virus, sehingga seleksi tanaman tahan berdasarkan jumlah bunga sebaiknya dilakukan pada fase pemulihan (*recovery*) di akhir pengamatan saat pengaruh genetik kembali menguat. Jumlah bunga yang anjlok pada minggu ke-13–14 lalu pulih pada akhir pengamatan, yang konsisten dengan temuan bahwa nilai duga heritabilitas arti luas untuk karakter ketahanan penyakit pada sumber daya genetik lokal cabai terhadap infeksi virus daun keriting kuning, yaitu keparahan penyakit dan insidensi penyakit, masing-masing tercatat sebesar 0,47 (kategori sedang) dan 0,61 (kategori tinggi) (Andarwening *et al.*, 2022), mengindikasikan bahwa tekanan penyakit turut memengaruhi ekspresi karakter reproduktif secara temporer sebelum pengaruh genetik kembali menguat pada fase pemulihan.

Parameter jumlah buah (panen ke-1 hingga panen ke-6) menunjukkan peningkatan progresif, di mana pada panen ke-1 hingga ke-4 nilainya berada pada kriteria Rendah hingga Sedang (berkisar antara -0,01 hingga 0,39) akibat dari cekaman biotik (stres akibat infeksi virus), lalu melonjak tajam pada pengamatan akhir yaitu panen ke-5 (0,47) dan panen ke-6 (0,67) sehingga naik kelas ke kriteria Tinggi yang dikendalikan oleh genetik. Hal ini sejalan dengan penelitian Ganefianti *et al.*, (2017) bahwa hasil analisis diallel pada hibrida cabai tahan *Begomovirus*, di mana intensitas penyakit, tipe gejala, dan jumlah buah dikendalikan oleh interaksi gen, sedangkan bobot buah lebih dikendalikan oleh aksi gen aditif, dan secara keseluruhan nilai heritabilitas untuk seluruh karakter tergolong sedang hingga tinggi, sehingga pada fase akhir panen ketika tekanan virus mulai stabil, ekspresi genetik untuk jumlah buah menjadi lebih dominan dan dapat dijadikan dasar seleksi yang lebih andal, terutama pada perbandingan genotipe G1I, G2I, G3I, dan G4I dengan G1N, G2N, G3N, dan G4N untuk mengidentifikasi materi genetik yang mampu mempertahankan produktivitas buah di bawah cekaman penyakit daun keriting kuning. Rendahnya heritabilitas pada awal pengamatan ini sejalan dengan

konsep bahwa interaksi genotipe dengan lingkungan dapat menutupi atau mengaburkan ekspresi potensi genetik suatu karakter pada kondisi lingkungan tertentu, sehingga nilai duga heritabilitas menjadi lebih kecil dari yang seharusnya (Farhah *et al.*, 2022).

4.2.4 Nilai Korelasi Tanaman Cabai Besar

Pola korelasi pada karakter vegetatif menunjukkan bahwa hubungan antara tingkat keparahan penyakit (AUDPC) dan pertumbuhan tanaman cabai bersifat kompleks dan tidak selalu bermakna negatif secara sederhana. Korelasi positif antara kenaikan AUDPC dengan tinggi tanaman ($r = 0,530$) sejalan dengan mekanisme fisiologis bahwa infeksi virus, termasuk *Begomovirus* penyebab keriting daun, dapat mengganggu jalur pertahanan dan metabolisme tanaman cabai sehingga memicu respons pertumbuhan abnormal seperti pemanjangan sel akibat gangguan hormonal (Ishfaq *et al.*, 2024), yang pada genotipe G1I, G2I, G3I, dan G4I tampak sebagai pertambahan tinggi yang tidak proporsional dengan perkembangan organ lain. Sebaliknya, korelasi negatif sangat kuat antara AUDPC 2 dengan tinggi tanaman ($r = -0,931$) menegaskan bahwa begitu gejala penyakit mereda, pertumbuhan tinggi tanaman kembali mengikuti pola normal sesuai potensi genetiknya, konsisten dengan temuan bahwa proses pemulihan fenotipik pada tanaman cabai yang terinfeksi *Begomovirus* ditandai dengan kembalinya pola pertumbuhan vegetatif ke kondisi mendekati tanaman sehat (Sipriyadi *et al.*, 2022).

Korelasi positif kuat antara AUDPC dan diameter batang ($r = 0,577$) juga konsisten dengan gejala umum infeksi *Begomovirus* pada cabai, yang dilaporkan menyebabkan penebalan tulang daun (*vein swelling*) dan gangguan jaringan pembuluh sebagai respons pertahanan lokal terhadap akumulasi partikel virus (Andarwening *et al.*, 2022), sehingga penebalan batang pada genotipe G1I, G2I, G3I, dan G4I lebih mencerminkan reaksi stres biotik daripada pertumbuhan normal, dan melemahnya korelasi menjadi $r = 0,2120$ saat AUDPC menurun menunjukkan bahwa pembesaran diameter batang pada kondisi tersebut kembali mengikuti pola pembelahan sel alami sebagaimana pada genotipe G1N, G2N, G3N, dan G4N. Adapun korelasi negatif antara AUDPC dan panjang internode ($r = -0,466$) menegaskan bahwa gejala kerdil akibat infeksi PepYLCV secara visual ditandai dengan memendeknya ruas antar cabang seiring meningkatnya keparahan penyakit (Hamdayanty & Hardina, 2023), sementara korelasi negatif kuat ($r = -0,732$) saat AUDPC menurun mengindikasikan pemulihan kapasitas

elongasi ruas batang begitu tekanan virus mereda. Pola serupa terlihat pada jumlah cabang, di mana korelasi positif sedang saat AUDPC naik ($r = 0,611$) selaras dengan laporan bahwa infeksi *Begomovirus* pada *Capsicum* dapat menimbulkan perubahan arsitektur tajuk berupa percabangan abnormal dan pertumbuhan terhambat pada tingkat keparahan gejala yang tinggi (Siddique *et al.*, 2022), sedangkan adanya korelasi negatif kuat AUDPC 2 dengan jumlah cabang ($r = -0,696$) menunjukkan bahwa perbanyakkan cabang pada fase pemulihan berjalan lebih stabil dan proporsional sesuai potensi genetik genotipe, sebagaimana terlihat pada genotipe cabai dengan kapasitas *recovery* baik yang mampu mengembalikan pola percabangan mendekati kondisi normal (Rout *et al.*, 2025).

Pada karakter generatif, korelasi positif sangat kuat antara kenaikan AUDPC dengan umur bunga ($r = 0,892$) yang mebgindikasikan adanya penundaan waktu kemunculan bunga pertama mencerminkan realokasi sumber daya metabolik tanaman dari fase generatif ke respons pertahanan pada awal infeksi, sejalan dengan laporan bahwa tanaman cabai yang terinfeksi berat pada usia muda cenderung mengalami keterlambatan inisiasi pembungaan dan bahkan gagal panen (Widodo & Taufik, 2024). Nilai korelasi positif sangat kuat AUDPC 2 dengan umur bunga ($r = 0,898$) yang justru berwujud percepatan inisiasi pembungaan menunjukkan bahwa begitu tekanan penyakit menurun, tanaman memasuki fase kompensasi generatif dengan mempercepat pembentukan bunga sebagai strategi adaptif untuk mengejar potensi hasil yang tertunda, sejalan dengan pola kompensasi fisiologis yang juga teramati pada genotipe cabai toleran *Begomovirus* lainnya (Noviana *et al.*, 2025).

Hal ini diperkuat oleh korelasi positif sangat kuat AUDPC 1 dengan jumlah bunga ($r = 0,915$) yang menggambarkan lonjakan pembentukan bunga sebagai mekanisme kompensasi fisiologis saat tanaman berada di bawah tekanan infeksi tinggi, sementara korelasi negatif kuat AUDPC 2 dengan jumlah bunga ($r = -0,782$) menunjukkan bahwa produksi bunga pada fase pemulihan berlangsung lebih efisien dan terkendali tanpa pemborosan energi metabolik. Nilai korelasi negatif sangat kuat antara AUDPC 2 dengan jumlah buah ($r = -0,953$) menegaskan bahwa keberhasilan pembentukan dan pembesaran buah hingga masa panen sangat bergantung pada tuntasnya proses pemulihan fenotipik tanaman, konsisten dengan temuan bahwa setiap penurunan tingkat keparahan penyakit kuning keriting secara signifikan meningkatkan produksi buah cabai di lapangan,

sedangkan peningkatan keparahan penyakit justru menekan hasil panen secara nyata (Taufik *et al.*, 2023), sehingga secara agronomis genotipe G1I, G2I, G3I, dan G4I yang mampu menekan laju perkembangan AUDPC sejak fase vegetatif berpeluang menghasilkan jumlah buah yang mendekati potensi genotipe G1N, G2N, G3N, dan G4N pada akhir masa panen.

4.2.5 Nilai Analisis Multivariat

Berdasarkan analisis Biplot pada gambar di atas menunjukkan kelompok pertama di sebelah kanan terdiri dari parameter diameter batang, panjang internode, tinggi tanaman, jumlah bunga, buah, dan berat buah yang tampak hampir sejajar, artinya parameter-parameter tersebut memiliki hubungan positif yang kuat di mana genotipe dengan pertumbuhan vegetatif yang baik cenderung menghasilkan produksi yang lebih tinggi. Sementara itu, kelompok kedua di sebelah kiri yang mencakup parameter AUDPC dan nilai puncak keparahan memiliki vektor yang hampir sejajar, artinya AUDPC memiliki hubungan positif yang sangat kuat di mana genotipe dengan keparahan penyakit tinggi selama periode pengamatan juga memiliki akumulasi perkembangan penyakit (AUDPC) yang tinggi. Hal ini mencerminkan pola umum yang juga dilaporkan pada analisis multivariat tanaman terhadap tekanan penyakit, di mana analisis komponen utama dan biplot pada tanaman yang diuji terhadap penyakit tertentu secara konsisten memisahkan genotipe berdaya hasil tinggi dari genotipe yang rentan berdasarkan derajat keparahan penyakitnya (Azam *et al.*, 2024). Arah antara kedua kelompok tersebut berlawanan hampir 180°, yang artinya adanya hubungan negatif berupa kecenderungan penurunan pertumbuhan vegetatif dan hasil tanaman seiring dengan semakin tingginya tingkat keparahan penyakit. Hal ini menggambarkan hubungan antagonistik yang kuat, konsisten dengan temuan bahwa infeksi *Begomovirus* yang berat pada *Capsicum annuum* secara konsisten menekan pertumbuhan vegetatif dan kapasitas pembentukan buah tanaman yang terinfeksi (Siddique *et al.*, 2022), sehingga pada genotipe G1I, G2I, G3I, dan G4I peningkatan keparahan penyakit dari waktu ke waktu secara sistemik menekan seluruh komponen pertumbuhan dan hasil secara bersamaan, bukan hanya satu karakter tertentu.

Pada parameter jumlah cabang, arah vektornya tetap positif ke kanan meskipun mengarah ke bawah, yang berarti jumlah cabang tetap berkorelasi negatif terhadap parameter penyakit dan berkorelasi positif dengan karakter hasil, meskipun memiliki kontribusi pada komponen utama yang berbeda dari karakter

agronomi lainnya. Sejalan dengan penelitian Ganefianti *et al.*, (2017) jumlah cabang dan karakter ketahanan pada hibrida cabai terhadap *Begomovirus* dikendalikan oleh mekanisme genetik berbeda dari karakter komponen hasil, sehingga responsnya terhadap tekanan penyakit tidak selalu identik dengan karakter produksi (Ganefianti *et al.*, 2017). Sedangkan pada genotipe, G1I dan G3I berasosiasi dengan tingginya nilai AUDPC dan keparahan penyakit sehingga menunjukkan kecenderungan tingkat ketahanan yang lebih rendah mengindikasikan bahwa genotipe cabai yang menunjukkan keparahan dan kejadian penyakit daun keriting kuning yang tinggi dikategorikan memiliki tingkat ketahanan yang rendah terhadap infeksi *Begomovirus* (Andarwening *et al.*, 2022), sehingga kedua genotipe tersebut perlu diwaspadai sebagai materi genetik yang rentan apabila digunakan dalam program pemuliaan ketahanan. Sedangkan G4I dan G2I berasosiasi dengan karakter pertumbuhan yang baik seperti diameter batang dan panjang internode serta berada jauh dari vektor penyakit. Hal ini mengindikasikan potensi toleransi genotipe tersebut terhadap tekanan virus, konsisten dengan temuan bahwa genotipe cabai dengan nilai heritabilitas dan keragaman genetik tinggi pada karakter morfologi di bawah infeksi virus daun keriting kuning berpotensi dipertahankan sebagai sumber ketahanan potensial dalam seleksi lanjutan (Sayekti *et al.*, 2021). Selain itu, genotipe yang tidak diinokulasi (G1N, G2N, G3N, dan G4N) membentuk kelompok yang bergerombol dan berlawanan arah dengan kelompok parameter penyakit, sejalan dengan penelitian Nabila *et al.*, (2025) genotipe yang berlawanan arah dengan kelompok parameter penyakit memperkuat prinsip bahwa tanpa adanya tekanan biotik, keragaman genotipe suatu populasi tanaman cenderung lebih dipengaruhi oleh potensi genetik bawaan sehingga karakter agronomi dapat terekspresikan secara optimal.

4.2.6 Implikasi Penelitian

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap strategi pemuliaan tanaman cabai, khususnya dalam upaya perakitan varietas yang tahan terhadap infeksi *Begomovirus*. Penemuan mekanisme pemulihan gejala secara fenotipik pada genotipe G2I (*C. annuum* var. Sios Tavi × *C. frutescens* var. Katokkon) dan G4I (*C. annuum* var. Sios Tavi × *C. frutescens* var. Kerinci) yang mampu menekan intensitas penyakit hingga 0% membuktikan keberhasilan persilangan interspesifik sebagai terobosan dalam memindahkan gen-gen ketahanan dari kerabat dekat (*C. frutescens*) ke dalam latar belakang genetik

cabai besar (*C. annuum*). Selain itu, ditemukannya nilai heritabilitas yang tinggi pada karakter tinggi tanaman ($h^2 = 0,51 - 0,75$), jumlah cabang ($h^2 = 0,71 - 0,87$), dan jumlah buah pada panen akhir ($h^2 = 0,67$) menegaskan bahwa seleksi fenotipik pada generasi awal maupun lanjut dapat dilakukan secara efektif berdasarkan karakter-karakter tersebut karena ragam genetik berkontribusi lebih dominan dibandingkan faktor lingkungan. Secara khusus, genotipe G4I terbukti sebagai kombinasi genotipe terbaik yang menggabungkan tingkat ketahanan mutlak (Tahan, AUDPC terendah) dengan potensi hasil tertinggi (294 buah per tanaman dan total berat buah 526,26 g), sehingga genotipe hibrida ini sangat potensial untuk dilanjutkan ke tahap uji daya hasil dan pemantapan galur murni guna dilepas sebagai varietas unggul baru (VUB).

Penelitian ini menawarkan solusi nyata bagi tingkat usaha tani cabai di lapangan yang sering kali terkendala oleh serangan penyakit keriting kuning (*Pepper Yellow Leaf Curl Virus*). Penggunaan varietas tahan atau toleran berbasis genotipe unggul seperti G4I dan G2I dapat menghemat biaya produksi petani secara signifikan melalui efisiensi penggunaan pestisida, sekaligus mengurangi ketergantungan pada penggunaan insektisida sintesis secara masif untuk mengendalikan populasi vektor *Bemisia tabaci*. Langkah ini mendukung penerapan konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) yang lebih ramah lingkungan. Mengingat infeksi *Begomovirus* kerap memicu kegagalan panen total hingga 100% pada sentra-sentra produksi, adopsi genotipe yang memiliki ketahanan dinamis ini mampu memberikan kepastian produksi bagi petani serta menjamin stabilitas pasokan dan harga cabai nasional dari ancaman anomali iklim maupun epidemi virus.

Penelitian ini memberikan gambaran atau wawasan bagi pengembangan riset pemuliaan tanaman selanjutnya. Adanya fluktuasi nilai heritabilitas pada parameter jumlah bunga dan buah yang dipengaruhi oleh guncangan stres infeksi virus di awal masa pertumbuhan mengimplikasikan bahwa evaluasi dan seleksi untuk karakter komponen hasil sebaiknya tidak dilakukan pada fase puncak infeksi, melainkan pada fase pemulihan (*recovery*) di akhir pengamatan saat ekspresi genetik tanaman telah kembali stabil. Selain itu, ditemukannya fenomena pemulihan secara fenotipik ini memberikan peluang bagi penelitian lanjutan di tingkat molekuler, seperti pemetaan marka molekuler untuk seleksi berbasis marka (*Marker-Assisted Selection/MAS*), serta analisis jalur fisiologis dan biokimia seperti

mekanisme *RNA silencing* atau regulasi hormon fitopatologi yang mendasari sifat ketahanan dinamis tersebut.