

PENGARUH PENAMBAHAN ASAM HUMAT PADA PERTUMBUHAN DAN HASIL TANAMAN SEMANGKA*Effect of Humic Acid Addition on Growth and Yield of Watermelon***Erse Drawana Pertiwi¹, Asmuliani R.^{2*}, Kila Thalib³**^{1,2,3} *Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian dan Ilmu Perikanan Universitas Pohuwato
Jalan Trans Sulawesi No. 147 Kec. Marisa Kab. Pohuwato, Gorontalo, Indonesia*^{2*)} *asmulianirasyid@gmail.com***ABSTRAK**

Tujuan dari penelitian adalah mengetahui pengaruh penambahan asam humat terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman semangka. Penelitian ini menggunakan satu faktor dalam Rancangan Acak Kelompok yaitu perlakuan pemberian asam humat dengan empat konsentrasi berbeda (0, 3, 6, dan 9 g/L). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian asam humat secara signifikan berpengaruh terhadap panjang sulur tanaman dan selebihnya tidak berpengaruh. Perbedaan dosis tidak berpengaruh signifikan pada berat buah, lingkaran buah, berat buah per tanaman dan berat buah per plot. Hasil tersebut menjelaskan bahwa peningkatan dosis asam humat tidak memberikan perubahan nyata pada hasil panen buah semangka. Dengan demikian, penggunaan asam humat sebagai suplemen hara tanah dapat diminimalkan dengan pemberian dosis paling rendahnya yaitu 2 g/L.

Kata kunci: *asam humat, semangka, pembenah tanah*

ABSTRACT

The objective of this study was to determine the effect of humic acid addition on the growth and yield of watermelon. This research employed a single-factor Randomized Complete Block Design (RCBD), namely humic acid treatment with four different concentrations (0, 3, 6, and 9 g/L). The results showed that humic acid application significantly affected vine length, while other observed parameters were not significantly affected. Differences in dosage did not significantly influence fruit weight, fruit circumference, fruit weight per plant, or fruit weight per plot. These findings indicate that increasing the dosage of humic acid did not result in significant changes in watermelon yield. Therefore, the use of humic acid as a soil nutrient supplement can be minimized by applying the lowest effective dose, namely 2 g/L.

Keywords: *humic acid, soil conditioner, watermelon*

PENDAHULUAN

Tanaman semangka (*Citrullus vulgaris*) merupakan salah satu komoditas hortikultura unggulan yang banyak dibudidayakan di Indonesia karena memiliki nilai ekonomi tinggi dan prospek pasar yang baik. Semangka digemari konsumen karena kandungan air yang tinggi, rasa manis, serta kandungan nutrisi seperti vitamin C, likopen, vitamin A, vitamin E, dan antioksidan yang bermanfaat bagi kesehatan (Utami, *et. al.*, 2025). Seiring meningkatnya kebutuhan konsumsi buah, tuntutan terhadap peningkatan produktivitas dan kualitas hasil tanaman

semangka juga semakin besar. Oleh karena itu, upaya peningkatan pertumbuhan dan hasil tanaman semangka menjadi aspek penting dalam sistem budidaya hortikultura berkelanjutan.

Produktivitas tanaman semangka sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara dan kondisi tanah. Pada praktik budidaya di lapangan, petani masih sangat bergantung pada pupuk anorganik untuk memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman. Penggunaan pupuk kimia secara terus-menerus dan tidak seimbang dapat menurunkan kesuburan tanah, menyebabkan degradasi sifat fisik, kimia,

dan biologi tanah, serta menurunkan efisiensi serapan hara oleh tanaman. Kondisi ini berpotensi menekan pertumbuhan vegetatif dan hasil tanaman semangka dalam jangka panjang. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif atau bahan pendukung pemupukan yang mampu memperbaiki kualitas tanah sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara (Widowati, *et al.*, 2022).

Salah satu bahan organik yang berpotensi mendukung sistem budidaya semangka adalah asam humat. Asam humat merupakan senyawa organik kompleks hasil dekomposisi bahan organik yang memiliki peran penting dalam pembentukan dan pemeliharaan kesuburan tanah (Zhao, *et al.*, 2024). Dalam beberapa dekade terakhir, asam humat banyak dikaji sebagai pembenah tanah (*soil conditioner*) dan biostimulan tanaman. Asam humat diketahui mampu meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara makro dan mikro di dalam tanah (Khatami, *et al.*, 2019).

Selain memperbaiki sifat tanah, asam humat juga berpengaruh langsung terhadap fisiologi tanaman. Beberapa penelitian melaporkan bahwa asam humat dapat merangsang pertumbuhan akar melalui peningkatan aktivitas hormon auksin, memperbaiki penyerapan nitrogen,

fosfor, dan kalium, serta meningkatkan laju fotosintesis tanaman (Nardi, *et al.*, 2018). Aplikasi asam humat mampu meningkatkan biomassa dan hasil pada tanaman melalui perbaikan kondisi rizosfer dan peningkatan efisiensi pemupukan. Selain itu, penggunaan asam humat juga terbukti meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam mineralisasi unsur hara, sehingga nutrisi menjadi lebih tersedia bagi tanaman (Guo, *et al.*, 2025).

Pada tanaman semangka, beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi asam humat berpotensi meningkatkan komponen pertumbuhan dan hasil, seperti panjang sulur, jumlah bunga betina, bobot buah, dan kandungan gula buah. Namun demikian, hasil penelitian yang ada masih menunjukkan variasi respons, tergantung pada dosis, metode aplikasi, dan kondisi lingkungan. Pada dosis tertentu, asam humat dapat meningkatkan hasil secara signifikan, tetapi pada dosis yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, respons tanaman tidak selalu optimal. Hal ini menunjukkan bahwa respons tanaman semangka terhadap aplikasi asam humat masih memerlukan kajian lebih lanjut secara sistematis dan terukur (Sakinah, *et al.*, 2023).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa asam humat memiliki potensi besar sebagai bahan pendukung pemupukan yang ramah lingkungan untuk meningkatkan pertumbuhan dan hasil

tanaman semangka. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui sejauh mana aplikasi asam humat berpengaruh terhadap parameter pertumbuhan dan hasil tanaman semangka secara kuantitatif. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan judul “Pengaruh Aplikasi Asam Humat terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Semangka”, dengan harapan dapat memberikan dasar ilmiah dalam pengembangan teknologi budidaya semangka yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODOLOGI PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini berlangsung dari September sampai Desember 2024. Penelitian ini dilaksanakan di lahan penelitian Desa Palopo Kecamatan Marisa Kabupaten Pohuwato Provinsi Gorontalo.

Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan yaitu benih tanaman semangka varietas patriot F1, asam humat, air, dan pupuk kandang. Alat-alat yang digunakan yaitu parang, cangkul, timbangan analitik, meteran, papan label perlakuan, timbangan analog, alat tulis menulis, gunting, kamera, dan pisau.

Rancangan Percobaan

Penelitian ini menggunakan rancangan acak kelompok dengan perlakuan penambahan asam humat.

Penelitian ini terdiri dari empat taraf perlakuan yaitu kontrol atau tanpa pemberian asam humat (H_0); pemberian asam humat 1 gr/L air (H_1); pemberian asam humat 2 gr/L air (H_2); dan pemberian asam humat 3 gr/L air (H_3). Setiap perlakuan diulang sebanyak empat kali percobaan sehingga terdiri dari 16 unit bedengan pengamatan.

Prosedur Penelitian

Melakukan penyemaian benih semangka. Sambil menunggu bibit tersebut tumbuh, membersihkan lahan yang akan digunakan kemudian membuat bedengan dengan lebar 2 meter, panjang 3 meter, dan jarak antar bedengan sekitar 50 cm. Melakukan pemupukan dasar menggunakan pupuk kandang dengan cara mencampurkan secara merata ke dalam bedengan sebelum penanaman. Sekitar dua minggu setelah pemupukan dan bibit semangka telah memiliki 2 atau 3 helai daun sejati, maka sudah siap dipindahkan dan ditanam dibedengan.

Sekitar tujuh hari setelah tanam (HST), mengaplikasikan asam humat ke tanaman semangka yang dilakukan pada sore hari. Terlebih dahulu menimbang asam humat 1 gr, 2 gr, dan 3 gr masing-masing sebanyak empat kali. Kemudian melarutkan asam humat ke dalam satu liter air dan menyiramkan larutan tersebut ke area perakaran tanaman sesuai dengan bedengan perlakuan. Selanjutnya pengaplikasiannya

dilakukan pada 14 HST, 21 HST, dan 28 HST.

Pemeliharaan tanaman meliputi penyiraman setiap hari pada saat pagi dan sore hari, jika kondisi hujan, penyiraman tidak perlu dilakukan. Pemupukan lanjutan (urea dan NPK) pada 14 HST fase vegetatif, 28 HST awal berbunga, 35-40 HST pembesaran buah. Penyiangan dilakukan setiap minggu secara manual. Pengendalian hama dan penyakit sesuai kebutuhan. Sekitar 60-70 HST panen sudah bisa dilakukan, apabila telah memiliki tanda-tanda panen sebagai berikut: warna kulit bagian bawah berubah menjadi kuning krem, sulur kecil di dekat tangkai buah mengering, ketika buah diketuk mengeluarkan suara nyaring, dan kulit buah tampak mengkilap dengan pola garis terlihat jelas.

Analisis Data

Data hasil pengamatan yang diperoleh dari penelitian dianalisis menggunakan *Analysis of Varians* (ANOVA) atau analisis sidik ragam, apabila ada pengaruh perlakuan pada analisis sidik ragam maka dilakukan uji lanjut untuk membedakan rerata antar perlakuan dengan menggunakan uji Beda Nyata Jujur (BNJ) dengan tingkat kepercayaan 95% atau 99%.

Parameter Pengamatan

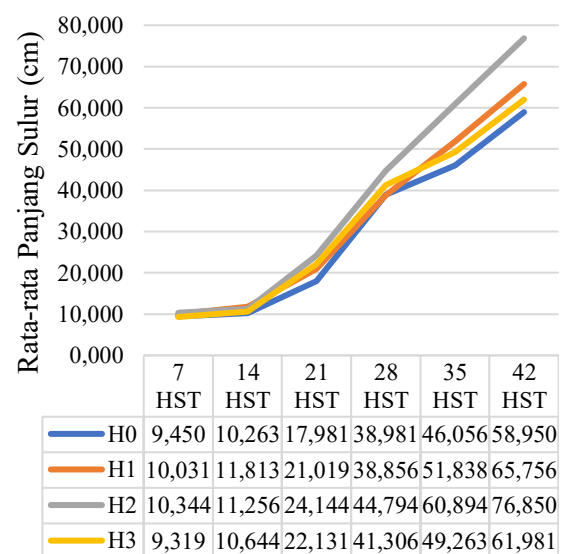
Parameter yang diamati terdiri dari parameter vegetatif dan parameter

generatif. Parameter vegetatif yaitu panjang sulur (cm), jumlah daun (helai), dan umur berbunga (hari). Sedangkan parameter generatif yaitu berat segar buah (kg), dan lingkaran buah (cm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Panjang Sulur

Berdasarkan hasil pengamatan rata-rata panjang sulur tanaman semangka mengalami pertumbuhan pengamatan di setiap minggu pada semua perlakuan pengamatan dilakukan selama 1 MST hingga 6 MST. Hasil analisis sidik ragam menyatakan bahwa pemberian pupuk asam humat tidak berpengaruh nyata terhadap panjang sulur tanaman semangka. Panjang sulur tanaman semangka pada setiap perlakuan disajikan pada Gambar 1.

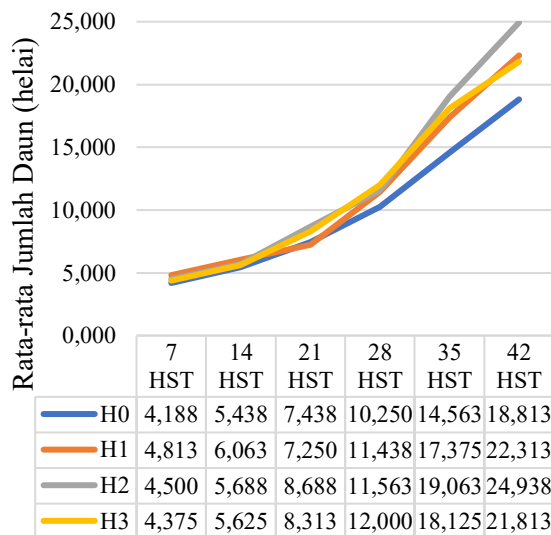


Gambar 1. Grafik garis rata-rata panjang sulur tanaman semangka. Kontrol (H₀), pemberian asam humat 1 gr/L (H₁); pemberian asam humat 2 gr/L (H₂); dan pemberian asam humat 3 gr/L (H₃).

Pada Gambar 1, dapat dilihat bahwa hasil pengamatan panjang sulur tanaman dari 7 HST sampai 42 HST semakin meningkat. Dari gambar tersebut dapat dilihat hasil dari rata-rata tertinggi yaitu pada perlakuan H₂ dengan rata-rata 76,850 cm sedangkan panjang sulur tanaman terendah pada tanaman semangka dengan perlakuan H₀, dengan nilai rata-rata yaitu 58,950 cm. Selama pengukuran sebanyak enam kali pengukuran H₂ selalu memiliki sulur terpanjang rata-rata dibandingkan dengan perlakuan yang lainnya.

Jumlah Daun

Selain pengamatan tinggi tanaman, daun semangka juga dihitung jumlah daunnya. Data jumlah daun (helai) tanaman semangka secara lengkap disajikan pada Gambar 2.



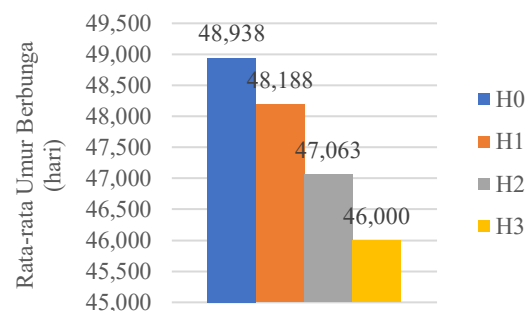
Gambar 2. Grafik garis rata-rata jumlah daun tanaman semangka. Kontrol (H₀), pemberian asam humat 1 gr/L (H₁); pemberian asam humat 2 gr/L (H₂); dan pemberian asam humat 3 gr/L (H₃).

Gambar 2 menjelaskan bahwa jumlah daun tanaman semangka terbanyak yaitu pada perlakuan H₂ yaitu 24,938 helai. Jumlah daun yang paling rendah terdapat pada perlakuan H₀. Hasil analisis sidik ragam menjelaskan bahwa perlakuan asam humat pada semangka tidak memberikan pengaruh nyata pada daun.

Umur Berbunga

Hasil dari analisis menunjukkan bahwa terdapat umur berbunga yang berbeda-beda. Berikut data umur berbunga pada tanaman semangka disajikan pada Gambar 3.

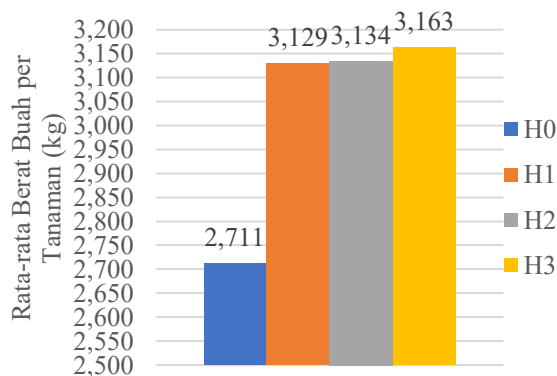
Gambar 3 memberikan hasil bahwa pada tanaman semangka terdapat perlakuan yang bisa mempengaruhi umur berbunga. Pada hasil analisis dapat dilihat yang paling cepat berbunga terdapat pada perlakuan H₀ yaitu 48,938. Menurut hasil analisis sidik ragam, pemberian asam humat pada tanaman semangka tidak berpengaruh pada proses berbunga.



Gambar 3. Grafik batang rata-rata umur berbunga tanaman semangka. Kontrol (H₀), pemberian asam humat 1 gr/L (H₁); pemberian asam humat 2 gr/L (H₂); dan pemberian asam humat 3 gr/L (H₃).

Berat Buah

Berat buah pada tanaman semangka (kg) dapat dilihat pada tabel lampiran. berikut adalah diagram rata-rata berat buah tanaman semangka dapat dilihat pada Gambar 4.



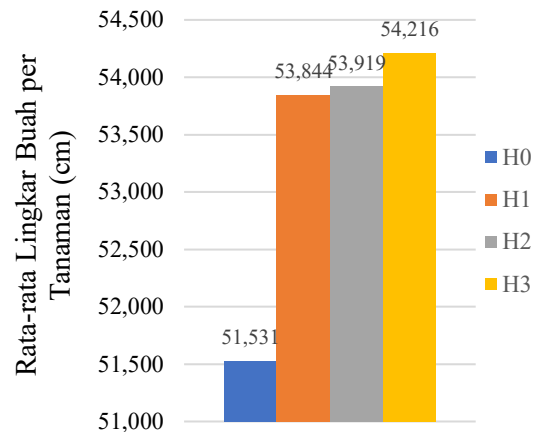
Gambar 4. Grafik batang rata-rata berat buah per tanaman semangka. Kontrol (H_0), pemberian asam humat 1 gr/L (H_1); pemberian asam humat 2 gr/L (H_2); dan pemberian asam humat 3 gr/L (H_3).

Gambar 4 menunjukkan bahwa berat buah pertanaman tertinggi terdapat pada perlakuan H_3 yaitu 3,163 kg. Rata-rata berat buah terendah terdapat pada perlakuan H_0 yaitu 2,711 kg. Menurut hasil analisis ragam, pemberian asam humat pada tanaman semangka tidak berpengaruh nyata pada buah semangka.

Lingkar Buah

Pengukuran lingkar buah dimulai dari bagian tengah buah semangka dengan menggunakan meteran kain untuk mendapatkan ukuran rata-rata lingkar buah semangka. Hasil analisis sidik ragam rata-

rata lingkar buah dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik batang rata-rata lingkar buah tanaman semangka. Kontrol (H_0), pemberian asam humat 1 gr/L (H_1); pemberian asam humat 2 gr/L (H_2); dan pemberian asam humat 3 gr/L (H_3).

Gambar 5 menunjukkan bahwa rata-rata lingkar tanaman semangka tertinggi terdapat pada perlakuan H_3 yaitu 54,216. Rata-rata lingkar buah terendah terdapat pada perlakuan H_0 . Menurut hasil analisis sidik ragam, pemberian asam humat tidak berpengaruh nyata pada lingkar buah semangka.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukan bahwa perlakuan penambahan asam humat tidak berpengaruh nyata namun dapat meningkatkan panjang sulur tanaman semangka pada setiap minggunya. Hal ini sesuai dengan pendapat Heil (2005) yang menyatakan bahwa asam humat dapat memicu pertumbuhan pada tanaman secara langsung dan memainkan peran aktif

melalui peningkatan laju proses fotosintesis, pertumbuhan dan hasil. Jika disertai dengan penggunaan pupuk dengan kandungan fosfor yang berguna untuk membantu pembelahan sel-sel muda, dapat mempercepat proses fotosintesis yang disebabkan karena meningkatnya kandungan klorofil pada daun.

Jumlah daun pada tanaman semangka yang tertinggi yaitu pada perlakuan H₂ (pemberian asam humat 2 gr/L air) yaitu 24,938 helai. Sedangkan jumlah daun paling sedikit terdapat pada perlakuan H₀ (kontrol atau tanpa pemberian asam humat) yaitu 18,813 helai. Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pemberian asam humat pada semangka berpengaruh tidak nyata terhadap jumlah daun. Peningkatan jumlah daun tanaman semangka tergantung kondisi di sekeliling tanaman itu sendiri atau kesuburan tanah, pendapat tersebut diperkuat oleh Maritta (2025).

Secara fisiologis, umur berbunga tanaman dipengaruhi oleh faktor genetik, kondisi lingkungan, serta ketersediaan unsur hara. Pemberian asam humat dalam penelitian ini diduga belum mampu memberikan perubahan signifikan terhadap fase generatif tanaman khususnya pembungaan. Hal ini sejalan dengan pendapat Sakinah, *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa pemberian asam humat pada tanaman semangka tidak memberikan

pengaruh nyata terhadap beberapa parameter pertumbuhan tertentu meskipun dapat meningkatkan kualitas hasil seperti berat buah. Lebih lanjut dikemukakan oleh Pratiwi dan Santika (2024), pertumbuhan tanaman semangka sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan cahaya yang berperan penting dalam proses pembungaan dan perkembangan tanaman.

Perlakuan H₃ menghasilkan berat buah tertinggi yaitu 3,163 kg, diikuti H₂ (3,134 kg), H₁ (3,129 kg), dan terendah pada H₀ (2,711 kg). Meskipun terdapat kecenderungan peningkatan berat buah seiring perlakuan, hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa pemberian asam humat tidak berpengaruh nyata terhadap berat buah semangka. Peningkatan berat buah secara fisiologis berkaitan erat dengan ketersediaan unsur hara, terutama unsur makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), yang berperan dalam pembentukan dan pengisian buah. Asam humat diketahui mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman. Namun, dalam kondisi tertentu, peningkatan tersebut tidak selalu memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil akhir tanaman. Hal ini sejalan dengan pendapat Mubarak, *et al.* (2025) juga melaporkan bahwa pemberian senyawa organik seperti asam fulvat tidak

memberikan pengaruh nyata terhadap parameter hasil tanaman semangka, sementara faktor varietas justru memberikan pengaruh yang lebih dominan terhadap ukuran dan hasil buah. Dengan demikian, perbedaan berat buah yang terjadi pada penelitian ini kemungkinan lebih dipengaruhi oleh faktor genetik atau kondisi lingkungan dibandingkan perlakuan asam humat itu sendiri.

Lingkar buah terbesar terdapat pada perlakuan H₃ yaitu 54,216 cm, sedangkan yang terkecil terdapat pada H₀ yaitu 51,531 cm. Secara umum, terlihat adanya kecenderungan peningkatan ukuran lingkar buah pada setiap perlakuan. Namun, berdasarkan hasil analisis sidik ragam, perbedaan tersebut tidak berpengaruh nyata. Artinya, pemberian asam humat belum mampu meningkatkan ukuran lingkar buah secara signifikan. Ukuran buah semangka dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara, terutama kalium (K), yang berperan dalam pembesaran buah. Asam humat sebenarnya dapat membantu memperbaiki kondisi tanah dan membantu penyerapan hara. Tetapi, pengaruhnya tidak selalu langsung terlihat pada hasil seperti ukuran buah. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan dosis asam humat tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan ukuran buah. Di sisi lain, penggunaan asam humat umumnya lebih efektif apabila dikombinasikan

dengan pupuk anorganik. Sejalan dengan pendapat Jannah, *et al.* (2025) menunjukkan bahwa asam humat dapat meningkatkan efisiensi penyerapan hara dan memperbaiki kesuburan tanah, terutama bila dikombinasikan dengan pupuk NPK. Hal ini menunjukkan bahwa peran utama asam humat adalah sebagai pembenah tanah (soil conditioner), bukan sebagai sumber hara utama yang secara langsung meningkatkan ukuran buah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan pemberian pupuk asam humat tidak memberikan perubahan nyata pada pertumbuhan dan hasil panen buah semangka. Dengan demikian, penggunaan asam humat sebagai suplemen hara tanah dapat diminimalisir dengan pemberian dosis paling rendahnya yaitu 2 g/L.

DAFTAR PUSTAKA

- Guo, Z., Gao, J., Lv, T., Zheng, Y., Deng, C., Sun, X., Sun, Y., Wang, C., dan Deng, Y. (2025). Humic acid enhances soil fertility and microbial diversity under optimized nitrogen fertilization in quinoa rhizosphere. *Plants Journal*. 4(24), 1-20.
- Heil, C. A. (2005). Influence of humic, fulvic, and hydrophilic acids on the growth, photosynthesis and respiration of the Dinoflagellate *Prorocentrum minimum* (Pavillard) Schiller. *Harmful Algae*, 4(3), 603-618.
- Jannah, A. N., Yurlisa, K., dan Sudiarso. (2025). Pengaruh pupuk NPK dan asam humat terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.). *Jurnal Produksi Tanaman*, 13(9), 617-629.

- Khatami, S., Deng, Y., Tien, M., dan Hatcher, P. G. (2019). Lignin contribution to aliphatic constituents of humic acids through fungal degradation. *Journal of Environmental Quality*. 48(6), 1565-1570.
- Maritta, E. (2025). Respon pertumbuhan dan hasil tanaman semangka (*Citrullus lanatus*) akibat aplikasi asam humat dan dosis pupuk KNO₃. [Skripsi]. Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya. Malang.
- Mubarak, A. D., Bariyyah, K., dan Hadi, A. (2025). Pengaruh fulvic acid terhadap pertumbuhan dan daya hasil beberapa semangka exotic. *JOAS: Journal of Agricultural Sustainability*, 1(2), 51-58.
- Nardi, S., Pizzeghello, D., Muscolo, A., dan Vianello, A. (2018). Physiological effects of humic substances on higher plants. *Soil Biology and Biochemistry*. 34, 1527-1536.
- Pratiwi, D. A. P. dan Santika, P. (2024). Peningkatan mutu benih dan pertumbuhan vegetatif semangka (*Citrullus lanatus* L.) kadaluarsa melalui priming dengan beberapa suber ZPT alami. *Prosiding Seminar dan Bimbingan Teknis Pertanian Politeknik Negeri Jember. AGROPROSS: National Conference Proceedings of Agriculture*, 394-401.
- Sakinah, N., Bariyyah, K., dan Hadi, A. (2023). Respon perkembangan buah pada tanaman semangka terhadap pemberian asam humat sebagai dasar budidaya. *AGROTEKMA: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 7(2), 31-33.
- Utami, R. N., Putra, M. M., dan Ardiansyah, R. (2025). Respon pertumbuhan dan produksi tanaman semangka dengan menggunakan media tanam *cocopeat* dan kotoran kambing. *AGROVITAL : Jurnal Ilmu Pertanian*. 10(1), 87-93.
- Widowati, L. R., Hartatik, W., Setyorini, D., dan Trisnawati, Y. (2022). *Pupuk Organik - Dibuatnya Mudah, Hasil Tanam Melimpah*. Pusat Perpustakaan dan Penyebaran Teknologi Pertanian. Bogor.
- Zhao, J., Zhang, Y., Cong, H., Zhang, C. dan Wu, J. (2024). Quantifying the contribution of lignin to humic acid structures during composting. *Chemical Engineering Journal*, 492.