

PENGARUH SERBUK CANGKANG TELUR DAN PUPUK ORGANIK CAIR TERHADAP PERTUMBUHAN DAN PRODUKSI CABAI RAWIT YANG DITANAM DI TANAH SULFAT MASAM

Effects of Eggshell Powder and Liquid Organic Fertilizer on the Growth and Yield of Chili Pepper Grown on Acid Sulfate Soil

Muhammad Humaini¹, Muhammad Helmy Abdillah^{1*}

^{1,2}Program Diploma Budidaya Tanaman Perkebunan, Politeknik Hasnur Jl. Brigjen H. Hasan Basri, Handil Bakti, Kec. Alalak, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan 70582

*Email korespondensi: abdillah.helmy21@gmail.com)

ABSTRACT

Acid sulfate soils are marked by strong acidity, high solubility of Al and Fe, and low phosphorus (P) availability, conditions that limit vegetative and generative growth by disrupting root development and nutrient uptake. This study aimed to identify the optimal dosage of eggshell powder as a natural CaCO_3 source and the most effective concentration of rice-washing water liquid organic fertilizer (LOF) to improve the growth and yield of bird's eye chili cultivated in acid sulfate soils. The experiment used a two-factor Randomized Block Design (RBD) with eggshell powder doses of 0 g, 20 g, and 25 g combined with LOF concentrations of 200 mL and 300 mL. Measured parameters included soil pH, available P, plant height increment, number of flowers, number of fruits, and fresh fruit weight. The treatments significantly affected all observed variables. Eggshell powder increased soil pH by neutralizing H^+ ions, reducing Al toxicity and improving root zone conditions. Rice-washing water LOF enhanced microbial activity and contributed nutrients, particularly readily mineralized organic P. The best overall response occurred in the C1P2 treatment (20 g eggshell powder + 300 mL LOF), which produced optimal soil pH, the highest increase in available P, and improved growth and yield. In contrast, the higher eggshell dose (C2P2) raised pH beyond the ideal range, causing P to precipitate into Ca-P forms and reducing its availability. This study demonstrates that integrating natural CaCO_3 amendments with liquid organic fertilizers offers an effective, low-cost approach to improving chili productivity in acid sulfate soils.

Keywords: available phosphorus, fertilization, generative growth, soil amelioration, yield

PENDAHULUAN

Cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) merupakan komoditas hortikultura strategis yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan kontribusi signifikan terhadap pendapatan petani kecil di wilayah tropika. Kebutuhan pasar yang terus meningkat menuntut optimalisasi teknik budidaya untuk mencapai produktivitas yang lebih stabil dan berkelanjutan (Mega et al., 2025). Sistem produksi cabai sangat bergantung pada kondisi tanah dan strategi pengelolaan kesuburan yang tepat untuk memastikan pertumbuhan vegetatif dan generatif berlangsung optimal (Polii et al., 2019; Saidah et al., 2024). Identifikasi permasalahan agronomis menjadi prasyarat penting dalam intervensi pemupukan yang efektif dan adaptif.

Kebutuhan perluasan areal tanam ke lahan suboptimal menjadikan tanah sulfat masam sebagai pilihan strategis bagi ekstensifikasi produksi cabai rawit, terutama di wilayah dengan keterbatasan tanah mineral yang berkualitas. Tanah sulfat masam merupakan salah satu kendala utama dalam budidaya hortikultura karena karakteristiknya yang sangat asam dan tingginya kelarutan aluminium pada kondisi teroksidasi (Fahmi & Wakhid, 2018). Peningkatan kelarutan Al^{3+} pada pH rendah menyebabkan hambatan fisiologis pada sistem perakaran yang berpengaruh langsung terhadap penyerapan air dan unsur hara. Dinamika hidrologi lahan dan proses oksidasi pirit memperburuk kondisi tanah sehingga menyebabkan penurunan produktivitas tanaman pada level yang signifikan (Sarwani et al., 2014). Strategi ameliorasi berbasis pendekatan kimia dan organik menjadi semakin penting untuk menekan toksisitas Al dan meningkatkan ketersediaan hara esensial.

Aluminium terlarut pada media pertumbuhan bersifat fitotoksik dan menghambat pemanjangan akar, menurunkan aktivitas metabolik, serta memicu defisiensi berbagai unsur hara (Sopandie, 2013). Kombinasi antara toksisitas Al dan rendahnya ketersediaan kalsium atau magnesium memperburuk gangguan fisiologis tanaman dan menyebabkan penurunan laju pertumbuhan (Pusparani, 2018). Upaya peningkatan pH tanah melalui bahan pengapuran serta aplikasi sumber kalsium hayati menjadi pendekatan yang banyak direkomendasikan untuk menekan dampak toksisitas tersebut. Adaptasi bahan pengapuran alternatif yang

bersumber dari limbah biomineral memiliki relevansi strategis untuk kondisi lahan sulfat masam berbasis sumberdaya lokal seperti penggunaan cangkang telur yang merupakan limbah rumah tangga yang kaya kalsium. Pemanfaatan cangkang telur sebagai sumber kalsium dapat menjadi peluang pengelolaan hara yang berkelanjutan dan ekonomis pada sistem budidaya lahan bermasalah. Serbuk cangkang telur yang kaya kalsium karbonat telah dilaporkan memiliki efektivitas sebagai bahan amelioran yang mampu meningkatkan pH tanah dan menekan kelarutan (Carvalho et al., 2011; Lee et al., 2013). Variasi ukuran partikel dan perlakuan pra proses terbukti memengaruhi kecepatan pelarutan serta respons amelioratifnya terhadap sifat kimia tanah (Luo et al., 2018; Manyatshe & Sibali, 2025). Evaluasi empiris terhadap efektivitas serbuk cangkang telur pada berbagai jenis tanah masih menjadi kebutuhan penting dalam penyusunan rekomendasi teknis.

Keberlimpahan cangkang telur sebagai limbah organik domestik memperkuat urgensi penggunaannya sebagai amelioran yang dapat diakses oleh petani skala kecil di kawasan sulfat masam. Karakter fisikokimia serbuk cangkang telur memungkinkan fungsi ganda sebagai sumber kalsium serta bahan yang meningkatkan struktur agregat tanah melalui pembentukan kompleks mineral-organik (Diana et al., 2021). Berbagai percobaan stabilisasi menunjukkan perubahan signifikan pada parameter mekanik dan kimia tanah setelah aplikasi serbuk cangkang telur, termasuk peningkatan stabilitas agregat dan kapasitas tukar kation. Efek residu dari bahan organik dan interaksi mikroba tanah berkontribusi terhadap pelepasan kalsium secara bertahap selama masa tanam (Fadillah, 2025; Januaresty et al., 2025). Penentuan dosis yang tepat menjadi faktor kritis untuk mencapai efektivitas yang optimal pada tanaman hortikultura sensitif seperti cabai rawi.

Namun penggunaan cangkang telur sebagai sumber hara tidak mencukupi keperluan nutrisi tanaman, sebab hanya mengandung kalsium hampir 98% (Ajayan et al., 2020; Yonata et al., 2017). Oleh karena itu perlu penerapan pupuk organik cair berbasis limbah rumah tangga sebagai sumber nutrisi tambahan yang sangat relevan untuk meningkatkan kualitas tanah. Pupuk organik cair merupakan input agroekologis yang mampu meningkatkan aktivitas biologis tanah, memperbaiki ketersediaan hara mikro, dan merangsang pertumbuhan tanaman secara konsisten pada berbagai kondisi lingkungan (Kartana et al., 2021; Rahayu et al., 2016; Safitri et al., 2023). Respons positif tanaman cabai terhadap pupuk organik cair telah dilaporkan, meskipun pengaruhnya sangat bergantung pada komposisi bahan baku, konsentrasi, dan metode aplikasi. Kandungan mikroorganisme fungsional berperan dalam meningkatkan mobilisasi hara dan memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres abiotik, termasuk cekaman kemasaman tanah (Allouzi et al., 2022; M. Tariq et al., 2022).

Kebutuhan penelitian mengenai interaksi amelioran pH dengan pupuk organik cair sangat relevan untuk lahan sulfat masam. Kombinasi serbuk cangkang telur sebagai bahan yang dapat meningkatkan pH tanah dan POC air leri sebagai stimulan biokimia tanah berpotensi menjadi paket teknologi ameliorasi murah yang dapat mendukung intensifikasi cabai di tanah sulfat masam. Integrasi bahan amelioran berbasis kalsium dan pupuk organik cair yang mengandung N dan K berpotensi menciptakan efek sinergis dalam memperbaiki kondisi kimia dan biologi tanah pada sistem budidaya cabai di tanah sulfat masam. Berbagai studi yang telah dikemukakan menunjukkan bahwa kombinasi bahan organik dengan agen pengapuran alternatif mampu meningkatkan pertumbuhan, fotosintesis, serta produktivitas tanaman secara signifikan. Namun belum ada tinjauan ilmiah mengenai potensi sinergis antara amelioran CaCO_3 alami (cangkang telur) dengan POC dari air leri dan limbah buah dalam meningkatkan pertumbuhan cabai rawit di tanah sulfat masam. Oleh karena itu tujuan penelitian ini untuk menentukan dosis optimum serbuk cangkang telur dan konsentrasi POC air leri yang paling efektif untuk pertumbuhan dan hasil cabai pada tanah sulfat masam.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2024 hingga Mei 2025 di lahan surjan Desa Baulin, Kecamatan Candi Laras Selatan, Kabupaten Tapin. Pengambilan tanah topsoil sebanyak 20 kg untuk penyemaian dilakukan menggunakan sekop, kemudian tanah ditempatkan dalam nampan dan ditaburi arang sekam 500 g dan urea 20 g. Benih cabai hiyung varietas Bara direndam 30 menit sebelum disemai diatas nampan yang berisi tanah. Sembari itu, 10 kg cangkang telur dijemur selama 60 menit, kemudian dibangkit dan dihaluskan menggunakan lesung dan alu, lalu diayak untuk memperoleh butiran halus (Abdillah, 2021). Wadah plastik digunakan untuk menyimpan cangkang telur yang telah siap aplikasikan.

Pembuatan pupuk organik cair (POC) berbahan air leri dilakukan dengan sebanyak 10000 mL dalam ukuran 1000 mL yang dibuat berulang dalam waktu yang sama agar mudah untuk menakar dosis dalam pembuatan POC, botol plastik sebagai wadah fermentasi, serta panci sebagai media pengolahan air leri. Air leri yang digunakan adalah air pertama dari beras yang dicuci. Sisa buah jeruk dan murbei ditimbang menggunakan timbangan jarum, kemudian dipotong dengan pisau sebelum dicampurkan ke dalam air leri (Kusuma et al., 2022). Pengaduk digunakan untuk memastikan homogenitas larutan POC. Meteran berfungsi mengukur tinggi tanaman, sementara gunting digunakan untuk memanen buah cabai rawit. Kertas label

disiapkan untuk penandaan perlakuan. Dokumentasi kegiatan penelitian dilakukan menggunakan kamera ponsel.

Bahan tanam berupa benih cabai rawit varietas Bara, sedangkan tanah sulfat masam digunakan sebagai media utama. Tanah topsoil digunakan untuk penyemaian benih. Cangkang telur berfungsi sebagai bahan amelioran dan beras digunakan dalam pembuatan air leri sebagai bahan utama POC. *Effective Microorganisms* (EM4) ditambahkan untuk mempercepat proses fermentasi bahan organik, sedangkan molase berfungsi sebagai sumber energi mikroorganisme. Sisa buah jeruk digunakan sebagai tambahan asam sitrat yang diperlukan pada proses fermentasi. Fermentasi dilakukan selama 14 hari yang disimpan pada tempat teduh tidak terpapar matahari untuk menjaga stabilitas mikroba.

Rancangan percobaan yang digunakan adalah Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan dua faktor perlakuan. Faktor pertama adalah dosis serbuk cangkang telur, yaitu 20 g dan 25 g yang dimodifikasi dari Roefaida et al. (2023). Faktor kedua adalah konsentrasi POC berbahan air leri, yaitu 200 mL dan 300 mL berdasarkan modifikasi dari penelitian Wahyuni et al. (2024). Kombinasi kedua faktor menghasilkan empat perlakuan, yaitu:

K: Kontrol (tanpa perlakuan),
C₁P₁: Cangkang telur 20 g + POC 200 mL,
C₁P₂: Cangkang telur 20 g + POC 300 mL,
C₂P₁: Cangkang telur 25 g + POC 200 mL,
C₂P₂: Cangkang telur 25 g + POC 300 mL.

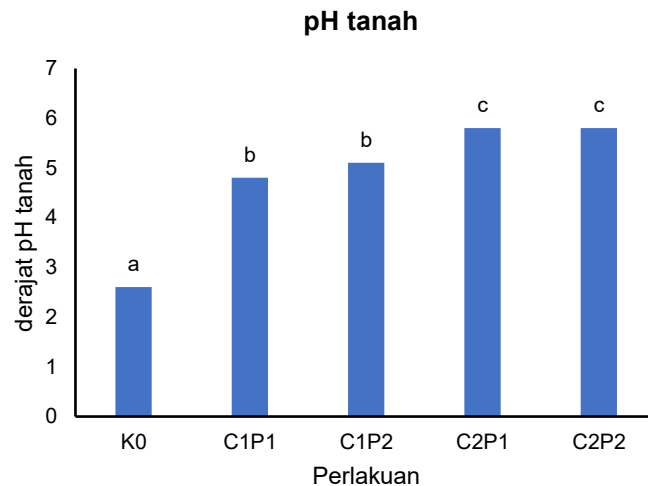
Pengamatan dilakukan terhadap parameter pertumbuhan dan produksi cabai rawit. Tinggi tanaman diukur empat kali pada umur 4 dan 8 minggu setelah pindah tanam. Jumlah bunga diamati sejak awal pembentukan bunga sempurna hingga tanaman mulai berbuah dalam 2 kali panen yang berjarak 30 hari dari panen pertama ke panen kedua. Jumlah buah dihitung sejak tanaman memasuki fase generatif sampai panen dalam 2 kali panen. Bobot buah segar diperoleh dengan menimbang seluruh hasil panen (akumulasi panen pertama dan panen kedua) per tanaman menggunakan timbangan digital.

Pengamatan pH tanah dan P-tersedia dilakukan pada saat tanaman memasuki fase generatif sebagai respons fisiologis tanaman terhadap perlakuan yang diberikan. Semua peubah dianalisis melalui pendekatan statistik inferensial yang mencakup pengujian asumsi normalitas (*Shapiro–Wilk*) dan homogenitas (*Bartlett Test*), diikuti analisis ragam untuk menguji signifikansi perlakuan (ANOVA faktorial) dengan F-hitung, p-value dan signifikansi antar perlakuan yang menentukan ada/ tidaknya perbedaan hasil setelah perlakuan antar masing-masing perlakuan. Ketika ANOVA menunjukkan perbedaan nyata, uji lanjut (BNJ α 5%) dilakukan untuk menentukan kelompok perlakuan yang berbeda secara signifikan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

pH-tanah

pH tanah terendah terdapat pada K₀, mencerminkan karakteristik asli tanah sulfat masam yang bersifat sangat asam. Kondisi ini disebabkan oleh tingginya konsentrasi sulfat yang teroksidasi menjadi asam sulfur serta tingginya kelarutan Al dan Fe dalam bentuk toksik. Perlakuan C₁P₁ dan C₁P₂ menunjukkan peningkatan pH yang nyata karena serbuk cangkang telur kaya CaCO₃ yang berfungsi sebagai amelioran. CaCO₃ bereaksi dengan ion H⁺ sehingga menurunkan kemasaman tanah. Pupuk organik cair (POC) juga memberikan kontribusi melalui perbaikan aktivitas mikroba tanah yang menghasilkan bahan organik penyangga pH.

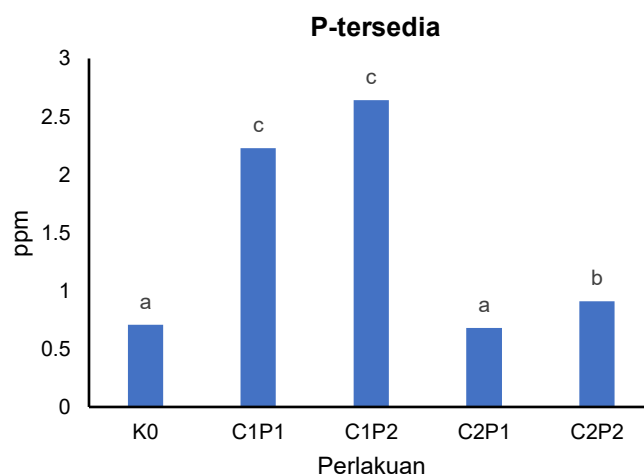


Gambar 1. Derajat pH hasil perlakuan yang diberikan. Huruf yang sama diatas batang pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ 5%.

Perlakuan C₂P₁ dan C₂P₂ menunjukkan pH tertinggi. Dosis serbuk cangkang telur yang lebih tinggi menyediakan lebih banyak CaCO₃ untuk menetralkan ion H⁺, sehingga pH naik lebih besar. Perbaikan pH ini berperan penting dalam mengurangi toksisitas Al dan meningkatkan aktivitas akar (Sharma et al., 2025). Meskipun pH meningkat signifikan, pH yang terlalu tinggi pada C₂P₂ dapat menyebabkan ketersediaan P menurun akibat terbentuknya senyawa Ca-P yang sukar larut di lingkungan perakaran (do Nascimento et al., 2018; Roeselers & Van Loosdrecht, 2010). Hal ini menjelaskan mekanisme produksi tanaman pada perlakuan ini tidak setinggi C₁P₂ meski pH tanah lebih tinggi.

P-tersedia

Nilai P-tersedia paling rendah pada K₀, sejalan dengan pH tanah yang sangat masam. Pada kondisi masam, fosfor banyak terikat dengan Fe dan Al sehingga menjadi tidak tersedia bagi tanaman. Hal ini menjelaskan rendahnya hasil tinggi tanaman, bunga, buah, dan berat buah. Perlakuan C₁P₁ dan C₁P₂ memberikan peningkatan P-tersedia yang cukup signifikan. Peningkatan pH tanah hingga kategori sedang menyebabkan fosfor yang sebelumnya terikat oleh Al dan Fe menjadi lebih mudah larut (Nierop et al., 2002). POC juga berperan menyediakan P organik yang mudah dimineralisasi oleh mikroba tanah (Mandalini et al., 2022).



Gambar 2. Fosfor tersedia dari hasil perlakuan yang diberikan. Huruf yang sama diatas batang pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ 5%.

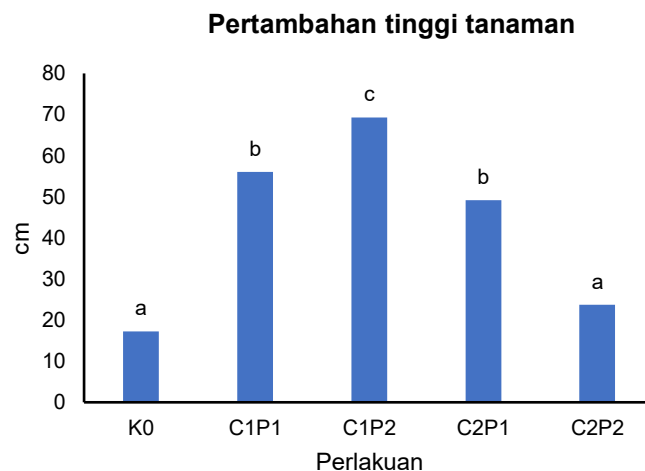
Respons tertinggi pada C₁P₂ menunjukkan bahwa kombinasi antara peningkatan pH yang optimal dan suplai nutrisi cair memberikan efek sinergis terhadap pelepasan P. Kondisi ini sangat mendukung pertumbuhan generatif tanaman, terbukti dari tingginya jumlah bunga, jumlah buah, dan berat buah. Sementara itu, C₂P₂ menunjukkan peningkatan P-tersedia, tetapi tidak setinggi C₁P₂. Hal ini karena dinamika

kation khususnya Ca^{+} di area perakaran yang terlalu tinggi menyebabkan P terikat kembali oleh Ca (El Habbasha & Ibrahim, 2015). Kondisi ini menurunkan efisiensi pemanfaatan P dan menjelaskan mekanisme variabel pertumbuhan dan produksi pada C_2P_2 tidak mencapai hasil tertinggi.

Pertambahan tinggi tanaman

Pertambahan tinggi tanaman menunjukkan respons paling rendah pada perlakuan K_0 , yang hanya mampu tumbuh sekitar 20 cm. Kondisi ini jelas dipengaruhi oleh karakteristik tanah sulfat masam yang memiliki pH rendah serta ketersediaan P yang sangat terbatas. Tanah dengan pH masam menyebabkan mobilitas Al^{3+} meningkat sehingga meracuni akar dan menghambat pemanjangan sel (Hajiboland et al., 2023; Panda et al., 2009). Rendahnya P-tersedia juga menurunkan perkembangan akar sehingga tanaman tidak mampu menyerap hara secara optimal (Conde et al., 2015; Khan et al., 2023).

Perlakuan C_1P_1 dan C_2P_1 meningkatkan pertambahan tinggi secara signifikan dibanding kontrol. Serbuk cangkang telur yang kaya CaCO_3 membantu menetralkan kemasaman tanah (Sebonela et al., 2024), sedangkan POC memperbaiki nutrisi makro-mikro sehingga menunjang metabolisme tanaman (Umadji et al., 2023). Kombinasi ini meningkatkan aktivitas meristem batang yang berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan tinggi tanaman.



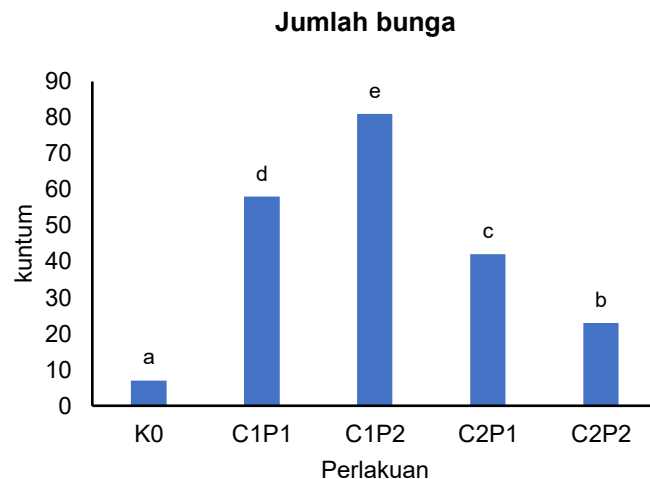
Gambar 3. Pertambahan tinggi tanaman dari hasil perlakuan yang diberikan. Huruf yang sama diatas batang pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ 5%.

Respons tertinggi terdapat pada perlakuan C_1P_2 , yang menghasilkan pertambahan tinggi mendekati 75 cm. Kombinasi dosis serbuk cangkang telur dan POC yang seimbang meningkatkan pH tanah hingga kategori mendekati netral dan meningkatkan P-tersedia secara signifikan. Kondisi tanah yang lebih baik membuat akar mampu mengeksplorasi media tanam secara lebih luas, sehingga penyerapan hara terutama N, P dan K meningkat dan berdampak pada pertumbuhan vegetatif.

Sementara itu C_2P_2 menunjukkan respons pertumbuhan lebih rendah dibanding C_1P_2 meskipun tetap lebih baik dari kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan dosis serbuk cangkang telur dan POC secara berlebihan tidak selalu menghasilkan pertumbuhan maksimal. Pada tanah sulfat masam, kenaikan pH yang terlalu tinggi justru dapat mengurangi kelarutan P, sehingga efektivitas penyerapan menurun. Ini menjelaskan pertumbuhan perlakuan C_2P_2 tidak setinggi C_1P_2 .

Jumlah bunga

Jumlah bunga terendah dijumpai pada perlakuan K_0 , menunjukkan bahwa sifat tanah sulfat masam yang buruk tidak mampu mendukung fase generatif tanaman. pH yang sangat rendah menghambat penyerapan unsur P dan Ca yang berperan penting dalam pembentukan organ generatif, sehingga tanaman tidak cukup kuat untuk membentuk bunga secara optimal (Tóth et al., 2020). Perlakuan C_1P_1 dan C_2P_1 memberikan peningkatan nyata terhadap jumlah bunga dibanding kontrol. Peningkatan pH tanah yang terjadi dapat memperbaiki kondisi fisiologis tanaman (Gentili, 2018) yang diinisiasi akibat aplikasi cangkang telur, sedangkan nutrisi tambahan dari POC meningkatkan fotosintesis sehingga energi untuk pembentukan bunga meningkat. Kombinasi ini membuat bunga yang muncul lebih banyak dan seragam.



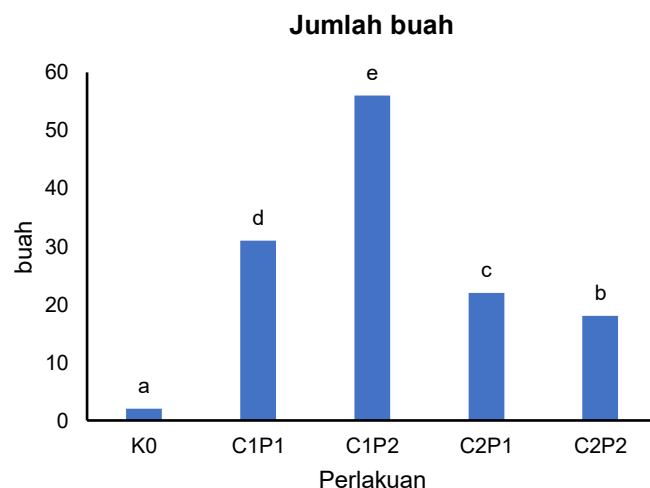
Gambar 4. Jumlah bunga tanaman cabai rawit yang diberi perlakuan. Huruf yang sama diatas batang pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ 5%.

Perlakuan C₁P₂ memberikan jumlah bunga tertinggi, yang menunjukkan bahwa dosis POC yang lebih tinggi meningkatkan suplai nutrisi dan hormon pemacu generatif seperti sitokinin (Lada & Kotouki, 2024). Peningkatan P-tersedia pada perlakuan ini juga mendukung pembentukan bunga karena P merupakan komponen penting dalam transfer energi (ATP) yang diperlukan untuk proses diferensiasi jaringan bunga (Hopkins, 2015; Khan et al., 2023). Pada perlakuan C₂P₂, jumlah bunga masih meningkat dibanding kontrol namun tidak setinggi C₁P₂. Keserupaan pola ini dengan variabel pertumbuhan lain menunjukkan bahwa keseimbangan antara Ca dari cangkang telur dan nutrisi cair dari POC perlu diperhatikan. Dosis yang terlalu tinggi dapat memicu antagonisme hara sehingga efisiensi penyerapan P menurun, yang berdampak langsung pada pembentukan bunga.

Jumlah buah

Jumlah buah terendah terjadi pada K₀, menunjukkan bahwa tanpa ameliorasi (cangkang telur) dan tanpa POC, tanaman tidak mampu melanjutkan fase generatif ke pembentukan buah secara optimal. Secara fisiologis, tanaman yang ditanam pada tanah sulfat masam mengalami hambatan penyerapan P, Ca, dan Mg disebabkan unsur ini tidak tersedia akibat terfiksasi/ dominasi logam berat, pH yang rendah, dan pencucian yang tinggi (Leiva Soto et al., 2023; Walna et al., 1998). Unsur ini yang berperan dalam pembentukan buah sehingga buah yang terbentuk sangat sedikit (Ernst, 2004; Jiaying et al., 2022).

Perlakuan C₁P₁ dan C₂P₁ meningkatkan jumlah buah secara signifikan. Peningkatan pH tanah akibat ameliorasi membantu menekan toksisitas Fe dan Al yang sering menjadi penghambat utama pada tanah sulfat masam. POC yang diberikan turut memasok N, P, K, dan unsur mikro sehingga perkembangan bunga menjadi buah lebih berhasil.



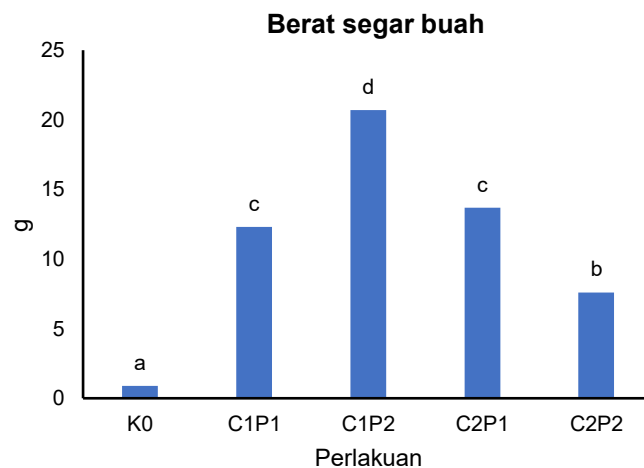
Gambar 5. Jumlah buah tanaman cabai rawit yang diberi perlakuan. Huruf yang sama diatas batang pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ 5%.

Jumlah buah paling banyak terdapat pada C₁P₂, menunjukkan bahwa kombinasi dosis sedang serbuk cangkang telur dengan POC dosis tinggi merupakan formula terbaik untuk mendukung pembentukan buah. Peningkatan pH tanah yang optimal dan peningkatan P-tersedia mendukung proses pembuahan, terutama pada fase penyerbukan dan pembentukan ovarium Interaction Between Macro - and Micro-Nutrients in Plants (Kumar et al., 2009). Sementara itu, C₂P₂ menghasilkan jumlah buah yang lebih rendah dari C₁P₂. Hal ini kembali mengindikasikan bahwa dosis cangkang telur yang terlalu tinggi berpotensi menaikkan pH melebihi kondisi optimal, sehingga P menjadi kurang tersedia. Akibatnya proses pembuahan menjadi kurang efisien dan jumlah buah menurun.

Berat segar buah

Berat buah terendah terdapat pada perlakuan K₀, yang menunjukkan bahwa kondisi tanah sulfat masam menghambat pengisian buah. Ketersediaan hara terbatas, khususnya P dan K, menyebabkan buah tumbuh kecil dan tidak dapat berkembang sempurna. Kondisi pH masam juga berdampak pada aktivitas enzim yang mengatur pembesaran sel pada buah (Kumar et al., 2009).

Perlakuan C₁P₁ dan C₂P₁ meningkatkan berat buah secara signifikan. Peningkatan pH tanah memperbaiki kondisi perakaran sehingga tanaman dapat menyerap air dan hara lebih optimal (Bagayoko et al., 2000). POC membantu memperbaiki metabolisme dan meningkatkan fotosintesis yang kemudian meningkatkan akumulasi karbohidrat pada buah, sehingga berat buah meningkat (Araya et al., 2006; Matsuda et al., 2014).



Gambar 6. Berat segar buah cabai rawit yang diberi perlakuan. Huruf yang sama diatas batang pada setiap perlakuan, menunjukkan hasil perlakuan tidak berbeda nyata menurut BNJ 5%.

Berat buah tertinggi diperoleh pada perlakuan C₁P₂. Pengaruh positif POC dosis tinggi terlihat jelas dalam meningkatkan pengisian buah, khususnya karena unsur P berperan penting dalam pembentukan gula dan energi yang dibutuhkan dalam pembesaran buah (Hanlon et al., 2005; Wu et al., 2021). Ketersediaan P yang meningkat pada perlakuan ini menjadi faktor utama meningkatnya bobot buah. Meskipun C₂P₂ tetap menghasilkan berat buah yang lebih baik dari K₀, hasilnya lebih rendah dibanding C₁P₂. Hal ini menunjukkan bahwa dosis cangkang telur yang terlalu tinggi kemungkinan menyebabkan kejenuhan basa yang berlebih antara P dengan Ca yang berinteraksi negatif (Singh et al., 2024; A. Tariq et al., 2023), mengganggu keseimbangan hara, dan menurunkan efektivitas nutrisi (Fageria, 2001) yang diberikan (POC). Akibatnya pengisian buah tidak seoptimal perlakuan C₁P₂.

KESIMPULAN

Kombinasi perlakuan berpengaruh nyata terhadap pH tanah, P-tersedia, serta parameter pertumbuhan dan produksi. Serbuk cangkang telur yang kaya CaCO₃ mampu menaikkan pH tanah dengan menetralkan pengaruh Al dan Fe yang bersifat toksik. Peningkatan pH memberikan lingkungan perakaran yang lebih baik sehingga pertumbuhan tinggi, jumlah bunga, jumlah buah, dan berat buah meningkat pada kombinasi tertentu, terutama perlakuan C₁P₂. Fluktuasi hasil antarperlakuan terjadi karena efektivitas setiap kombinasi bergantung pada kemampuan tanah melepaskan hara setelah pH naik. Pada dosis serbuk cangkang telur terlalu tinggi, menyebabkan presipitasi P oleh Ca menjadi bentuk Ca-P, sehingga P kurang tersedia meskipun pH meningkat. Peningkatan dosis serbuk cangkang telur sejalan dengan peningkatan pH, namun tidak selalu

berbanding lurus dengan peningkatan P-tersedia. POC air leri memberikan tambahan hara meskipun tidak optimal untuk pertumbuhan dan hasil tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, M. H. (2021). Memperbaiki Serapan Hara dengan Aplikasi Bahan Organik untuk Meningkatkan Resistensi Tanaman Cabai terhadap Virulensi Kutukebul. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 49(3), 280–287. <https://doi.org/10.24831/jai.v49i3.38254>
- Ajayan, N., K. P. S., A. U., A., & Soman, S. (2020). Quantitative Variation in Calcium Carbonate Content in Shell of Different Chicken and Duck Varieties. *Advances in Zoology and Botany*, 8(1), 1–5. <https://doi.org/10.13189/azb.2020.080101>
- Allouzi, M. M. A., Allouzi, S. M. A., Keng, Z. X., Supramaniam, C. V., Singh, A., & Chong, S. (2022). Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, 8(12), e12609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609>
- Araya, T., Noguchi, K., & Terashima, I. (2006). Effects of Carbohydrate Accumulation on Photosynthesis Differ between Sink and Source Leaves of Phaseolus vulgaris L. *Plant and Cell Physiology*, 47(5), 644–652. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcj033>
- Bagayoko, M., Alvey, S., Neumann, G., & Buerkert, A. (2000). Root-induced increases in soil pH and nutrient availability to field-grown cereals and legumes on acid sandy soils of Sudano-Sahelian West Africa. *Plant and Soil*, 225(1), 117–127. <https://doi.org/10.1023/A:1026570406777>
- Carvalho, J., Ribeiro, A., Environmental, I., & Agency, P. (2011). AI Adsorption Process Onto An Innovative Eggshell-Derived Low-Cost Adsorbent In Simulated Effluent And Real Industrial Effluents. *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities 1st International Conference, September 2011*, 8.
- Conde, L. D., Chen, Z., Chen, H., & Liao, H. (2015). Effects of Phosphorus Availability on Plant Growth and Soil Nutrient Status in the Rice/Soybean Rotation System on Newly Cultivated Acidic Soils. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 2(6), 309–316. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20140206.23>
- Diana, W., Widiati, A., & Hartono, E. (2021). The Strength Behaviour of Eggshell Powder Substitution on Soil-lime. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1144 012089. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1144/1/012089>
- do Nascimento, C. A. C., Pagliari, P. H., Faria, L. de A., & Vitti, G. C. (2018). Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. *Soil Science Society of America Journal*, 82(3), 622–631. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0211>
- El Habbasha, S. F., & Ibrahim, F. M. (2015). Calcium: Physiological Function, Deficiency and Absorption. *International Journal of ChemTech Research*, 8(12), 196–202.
- Ernst, W. H. O. (2004). Chapter 3 Vegetation, organic matter and soil quality. *Developments in Soil Science*, 29(C), 41–98. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(04\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(04)80007-2)
- Fadillah, R. (2025). Eggshell Fertilizer and Its Impact on Mustard Greens Productivity and Agribusiness Efficiency. *JERAMI: Indonesian Journal of Crop Science*, 8(1), 1–6.
- Fageria, V. D. (2001). Nutrient Interactions In Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8), 1269–1290. <https://doi.org/10.1081/PLN-100106981>
- Fahmi, A., & Wakhid, N. (2018). Karakteristik Lahan Rawa. In *Agroekologi Rawa* (pp. 91–118). PT. RajaGrafindo Persada. <https://www.researchgate.net/publication/328800813>
- Gentili, R. (2018). Effect of Soil pH on the Growth, Reproductive Investment and Pollen Allergenicity of Ambrosia artemisiifolia L. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1335. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01335>
- Hajiboland, R., Panda, C. K., Lastochkina, O., Gavassi, M. A., Habermann, G., & Pereira, J. F. (2023). Aluminum Toxicity in Plants: Present and Future. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(7), 3967–3999. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10866-0>
- Hanlon, E. A., Hochmuth, G. J., Obreza, T. A., & Chaplin, M. H. (2005). Phosphorus Nutrition of Vegetable Crops and Fruits. In *Phosphorus: Agriculture and the Environment* (pp. 521–540). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c16>
- Hopkins, B. G. (2015). Phosphorus. In *Handbook of Plant Nutrition* (pp. 66–111). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18458-6>
- Januaresty, D., Sasli, I., & Pramulya, M. (2025). Pengaruh Tepung Cangkang Telur Dan Pupuk Kandang Ayam Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Kecipir Pada Media Gambut. *Jurnal Sains Pertanian Equator*, 14(2), 305–312.
- Jiaying, M., Tingting, C., Jie, L., Weimeng, F., Baohua, F., Guangyan, L., Hubo, L., Juncai, L., Zhihai, W., Longxing, T., & Guanfu, F. (2022). Functions of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Energy Status and Their Influences on Rice Growth and Development. *Rice Science*, 29(2), 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005>
- Kartana, S. N., Fatmawati, E., & Wawan, W. (2021). Peranan pupuk organik cair (POC) bonggol pisang dalam meningkatkan pertumbuhan dan hasil jagung manis (Zea mays L. Saccharata sturt.). *Piper*, 17(2), 85–91.

- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. In *Plants* (Vol. 12, Issue 15, p. 2861). <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Kumar, S., Kumar, S., & Mohapatra, T. (2009). Interaction Between Macro - and Micro-Nutrients in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 151, 262–274. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665583>
- Kusuma, M. N., Muharamin, A., Wahyu, D., Dharma, S., Syafitri, D., Ardhana, I. M., Shobriyah, H. H., Sholihah, M., At-thayyibi, M. H., Lingkungan, J. T., Teknologi, I., & Tama, A. (2022). Pendayagunaan Limbah Buah sebagai Pupuk Organik Cair Dengan Metode Fermentasi EM4. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Terapan*, 9.
- Lada, Y. G., & Kotouki, N. (2024). Studi Pemanfaatan Limbah Air Cucian Beras Terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Cabe Merah (*Capsicum annuum* L.). *Jurnal Folium*, 8(2), 70–79.
- Lee, S. S., Lim, J. E., El-Azeem, S. A. M. A., Choi, B., Oh, S.-E., Moon, D. H., & Ok, Y. S. (2013). Heavy metal immobilization in soil near abandoned mines using eggshell waste and rapeseed residue. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(3), 1719–1726. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1104-9>
- Leiva Soto, A., Culman, S. W., Herms, C., Sprunger, C., & Doohan, D. (2023). Managing soil acidity vs. soil Ca:Mg ratio: What is more important for crop productivity? *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 9(1), e20210. <https://doi.org/10.1002/cft2.20210>
- Luo, W., Ji, Y., Qu, L., Dang, Z., Xie, Y., Yang, C., Tao, X., Zhou, J., & Lu, G. (2018). Effects of Eggshell Addition on Calcium-Deficient Acid Soils Contaminated with Heavy Metals. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12(3), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S11783-018-1026-Y>
- Mandalini, B. E., Sedijani, P., & Raksun, A. (2022). The Effects of Liquid Organic Fertilizer of Vegetable Waste on The Growth of Cayenne Pepper Plants (*Capsicum frutescens* L.). *Jurnal Biologi Tropis*, 22(4), 1309–1317.
- Manyatshe, A., & Sibali, L. L. (2025). A review on egg waste-based adsorbents for the removal of organic and inorganic contaminants from aqueous solution. *Heliyon*, 11(3), e42278. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42278>
- Matsuda, R., Ozawa, N., & Fujiwara, K. (2014). Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences. *Scientia Horticulturae*, 170(5), 150–158. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.014>
- Mega, A., Praptiwi, K., Putri, K. T., Arini, N., Nabillah, D., Kusmiati, A., Zainuddin, A., Produksi, K., Rawit, C., Mega, A., Praptiwi, K., Putri, K. T., Arini, N., & Nabillah, D. (2025). Persebaran dan Keunggulan Produksi Cabai Rawit (*Capsicum frutescens* L.) di Indonesia: Analisis Location Quotient (LQ). *Jurnal Agribisnis Wijaya Putra Surabaya*, 4(2), 93–104.
- Nierop, K. G. J. J., Jansen, B., & Verstraten, J. M. (2002). Dissolved organic matter, aluminium and iron interactions: precipitation induced by metal/carbon ratio, pH and competition. *Science of The Total Environment*, 300(1), 201–211. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00254-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00254-1)
- Panda, S. K., Baluška, F., & Matsumoto, H. (2009). Aluminum stress signaling in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 4(7), 592–597. <https://doi.org/10.4161/psb.4.7.8903>
- Polii, M. G. M., Sondakh, T. D., Raintung, J. S. M., Doodoh, B., & Titah, T. (2019). Kajian Teknik Budidaya Tanaman Cabai (*Capsicum annuum* L.) Kabupaten Minahasa Tenggara. *Eugenia*, 25(3), 72–77.
- Pusparani, S. (2018). Karakterisasi sifat fisik dan kimia pada tanah sulfat masam di lahan pasang surut. *Jurnal Hexagro*, 2(1), 1–4.
- Rahayu, S., Elfarsina, & Rosdiana. (2016). Respon pertumbuhan dan produksi tanaman bawang merah (*Allium ascalonicum* L.) dengan penambahan pupuk organik cair. *Jurnal Agrosains Dan Teknologi*, 1(1), 7–18.
- Roefaida, E., Kana, Y. R., Gandut, Y. R. Y., Oematan, S. S., Bunga, W., & Kati, T. U. P. M. (2023). Ameliorasi Limbah Cucian Beras Dan Cangkang Telur Ayam Terhadap Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum Frutescens* L.). *Agrisa*, 12(2), 125–139.
- Roeselers, G., & Van Loosdrecht, M. C. M. (2010). Microbial phytase-induced calcium-phosphate precipitation — a potential soil stabilization method. *Folia Microbiologica*, 55(6), 621–624. <https://doi.org/10.1007/s12223-010-0099-1>
- Safitri, N., Rosmalinda, R., & Assrorudin, A. (2023). Pengaruh pemberian pupuk organik cair bonggol pisang terhadap pertumbuhan bibit kopi robusta (*Coffea canephora*) pada media gambut. *Journal of Agro Plantation (JAP)*, 2(2), 191–199. <https://doi.org/10.58466/jap.v2i02.1377>
- Saidah, Z., Wulandari, E., & Hapsari, H. (2024). Analisis Sikap dan Persepsi Petani untuk Meningkatkan Produksi Cabai Merah Melalui Penggunaan Benih Unggul. *Agrikultura*, 35(2), 200–212.
- Sarwani, M., Sabiham, S., Maas, A., Las, I., Alimansyah, T., & Purnomo, E. (2014). Pengelolaan Lahan Sulfat Masam Untuk Usaha Pertanian. In *IAARD Press* (Vol. 1, Issue 8). <http://203.190.37.42/publikasi/p3241055.pdf>
- Sebonela, L. K., Elephant, D. E., & Sithole, N. J. (2024). Eggshells Improve Soil pH and P Availability in Sandy Loam and Sandy Clay Loamy Soil. In *Agronomy* (Vol. 14, Issue 11, p. 2539). <https://doi.org/10.3390/agronomy14112539>

- Sharma, U. C., Datta, M., & Sharma, V. (2025). Managing Soil Acidity. In U. C. Sharma, M. Datta, & V. Sharma (Eds.), *Soil Acidity: Management Options for Higher Crop Productivity* (pp. 427–522). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76357-1_5
- Singh, K., Gupta, S., & Singh, A. P. (2024). Review: Nutrient-nutrient interactions governing underground plant adaptation strategies in a heterogeneous environment. *Plant Science*, 342, 112024. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2024.112024>
- Sopandie, D. (2013). *Fisiologi Adaptasi Tanaman (terhadap Cekaman Abiotik pada Agroekosistem Tropika)*.
- Tariq, A., Zeng, F., Graciano, C., Ullah, A., Sadia, S., Ahmed, Z., Murtaza, G., Ismoilov, K., & Zhang, Z. (2023). Regulation of Metabolites by Nutrients in Plants. In *Plant Ionomics* (pp. 1–18). <https://doi.org/10.1002/9781119803041.ch1>
- Tariq, M., Jameel, F., Ijaz, U., Abdullah, M., & Rashid, K. (2022). Biofertilizer microorganisms accompanying pathogenic attributes: a potential threat. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(1), 77–90. <https://doi.org/10.1007/s12298-022-01138-y>
- Tóth, B., Juhász, C., Labuschagne, M., & Moloi, M. J. (2020). The Influence of Soil Acidity on the Physiological Responses of Two Bread Wheat Cultivars. In *Plants* (Vol. 9, Issue 11, p. 1472). <https://doi.org/10.3390/plants9111472>
- Umadji, N. I. R., Badu, R. R., & Rahman, A. (2023). Kandungan unsur hara pupuk organik cair dengan penambahan limbah cangkang telur ayam broiler. *Jambura Edu Biosfer Journal*, 5(2), 43–47.
- Wahyuni, S., Sepriani, Y., Sitanggang, K. D., & Triyanto, Y. (2024). Pengaruh Pemberian POC Air Cucian Beras Pada Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Cabai Merah (*Capsicum annum* spp). *Jurnal Pertanian Agros*, 26(1), 5718–5727.
- Walna, B., Drzymala, S., & Siepak, J. (1998). The impact of acid rain on calcium and magnesium status in typical soils of the Wielkopolski National Park. *Science of The Total Environment*, 220(2), 115–120. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00240-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00240-X)
- Wu, S., Li, M., Zhang, C., Tan, Q., Yang, X., Sun, X., Pan, Z., Deng, X., & Hu, C. (2021). Effects of phosphorus on fruit soluble sugar and citric acid accumulations in citrus. *Plant Physiology and Biochemistry*, 160(3), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.015>
- Yonata, D., Aminah, S., & Hersoelistyorini, W. (2017). Kadar Kalsium dan Karakteristik Fisik Tepung Cangkang Telur Unggas dengan Perendaman Berbagai Pelarut. *Jurnal Pangan Dan Gizi*, 7(2), 82–93.