2026, Vol. 4, No. 3, pp. 520-532
E-ISSN: 3025-9444

# Optimasi Spesifik-Sifat Pupuk Organik Cair Urine Sapi untuk Bayam Hidroponik Rakit Apung

**Sulaminingsih [1]✉, Charlie Novianry Panjaitan [2], Suwarno [3], M. Rehan Saputra [4]**
(1,2,3,4) Agroteknologi, Sekolah Tinggi Ilmu Pertanian Berau, Berau, Indonesia

**Abstrak:** Hidroponik rakit apung berpotensi mendukung produksi sayuran daun secara cepat, tetapi ketergantungan pada larutan nutrisi mineral komersial masih membatasi keterjangkauan dan sirkularitas sistem. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh pupuk organik cair (POC) urine sapi terhadap pertumbuhan bayam (*Amaranthus hybridus L.*) pada sistem hidroponik rakit apung dan mengidentifikasi zona perlakuan paling prospektif. Enam taraf perlakuan berkode B0–B5 diuji dengan lima ulangan. Tinggi tanaman, jumlah daun, dan lebar daun diukur pada 1, 2, dan 3 minggu setelah tanam (MST), sedangkan panjang akar diukur pada akhir percobaan. Data dianalisis dengan ANOVA satu arah dan ukuran efek eta kuadrat. Perlakuan berpengaruh nyata terhadap seluruh variabel pertumbuhan akhir. Pada 3 MST, B2 (35 ml POC urine sapi/L air) menghasilkan tanaman tertinggi (16,98 ± 0,41 cm), sedangkan B1 (30 ml POC urine sapi/L air) menghasilkan jumlah daun tertinggi (10,00 ± 1,00 helai tanaman−1), lebar daun terbesar (2,60 ± 0,14 cm), dan akar terpanjang (22,68 ± 7,03 cm). Ukuran efek tergolong besar untuk tinggi tanaman, jumlah daun, lebar daun, dan panjang akar. POC urine sapi membentuk respons vegetatif bayam secara nyata tetapi tidak linear. B1–B2 merupakan zona perlakuan paling menjanjikan.

**Article history:**
Received: 07 July 2026
Revised: 19 July 2026
Accepted: 21 July 2026
Published: 23 July 2026

**Kata Kunci:**
bayam hidroponik, urine sapi, pupuk organik cair, rakit apung, pertanian sirkular

**Abstract:** *Floating raft hydroponics can support rapid leafy vegetable production, yet reliance on commercial mineral nutrient solutions may limit affordability and circularity. This study evaluated the effect of cow urine-based liquid organic fertilizer on the growth of spinach (Amaranthus hybridus L.) in a floating raft hydroponic system and identified the most promising treatment zone. Six coded treatments (B0–B5) were tested with five replications. Plant height, leaf number, and leaf width were measured at 1, 2, and 3 weeks after transplanting, while root length was measured at the final observation. Data were analyzed using one-way ANOVA and eta-squared effect size. The treatments significantly affected all final growth variables. At 3 weeks after transplanting, B2 (35 ml cow urine fertilizer/L water) produced the tallest plants (16.98 ± 0.41 cm), whereas B1 (30 ml cow urine fertilizer/L water) produced the highest leaf number (10.00 ± 1.00 leaves plant−1), the widest leaves (2.60 ± 0.14 cm), and the longest roots (22.68 ± 7.03 cm). Effect sizes were large for final plant height, leaf number, leaf width, and root length. Cow urine-based liquid organic fertilizer markedly shaped spinach vegetative growth, but the response was non-linear. B1–B2 represent the most promising treatment zone.*

**Keyword:**
*hydroponic spinach, cow urine fertilizer, liquid organic fertilizer, floating raft, circular agriculture*

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

***How to cite***: Sulaminingsih, S., Panjaitan, C. N., Suwarno, S., & Saputra, M. R. (2026). Optimasi Spesifik-Sifat Pupuk Organik Cair Urine Sapi untuk Bayam Hidroponik Rakit Apung. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, *4*(3), 520–532. https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.723

## PENDAHULUAN

Bayam (*Amaranthus hybridus L.*) merupakan sayuran daun berumur pendek yang nilai agronomisnya ditentukan oleh perkembangan vegetatif yang cepat, seragam, dan terkoordinasi. Pada sistem produksi panen cepat, indikator keberhasilan tidak hanya kelangsungan hidup tanaman, tetapi juga tinggi tanaman, pembentukan daun, ekspansi daun, dan perkembangan akar. Keempat sifat tersebut menggambarkan kapasitas tanaman membentuk tajuk produktif sekaligus sistem akar yang aktif menyerap air dan hara dalam waktu singkat. Bukti terbaru menunjukkan bahwa input organik dan

✉ *Corresponding author:* ***sulamidiklat@gmail.com***
*Copyright © 2026, the author(s)*

biologis dapat memodifikasi pertumbuhan, hasil, kualitas, kandungan pigmen, dan toleransi stres pada bayam serta sayuran daun terkait, antara lain melalui *biofertilizer* , kompos, hidrolisat bulu ayam, pupuk organik cair berbasis limbah ikan, dan konsorsium bakteri pemacu pertumbuhan (Arfarita et al., 2024; Stanly & Umesh, 2024; Saleem et al., 2025; Parveen et al., 2026; Petrillo et al., 2022).

Sistem hidroponik, khususnya rakit apung, menyediakan jalur produksi sayuran daun pada ruang terbatas karena air dan hara diberikan langsung ke zona akar. Sistem ini relevan untuk rumah tangga, sekolah, kebun komunitas, dan petani kecil karena konstruksi serta pengelolaannya relatif sederhana. Namun, hidroponik konvensional umumnya bergantung pada larutan nutrisi mineral komersial. Larutan tersebut efektif, tetapi dapat meningkatkan biaya produksi dan mempertahankan ketergantungan pada input yang dibeli. Karena itu, pengembangan nutrisi alternatif berbasis bahan lokal menjadi arah penting bagi hidroponik berbiaya rendah dan berorientasi sirkular. Studi bioponik menunjukkan bahwa bahan organik lokal dapat diolah menjadi larutan nutrisi hidroponik, meskipun mineralisasi, kehilangan nitrogen, dan stabilitas larutan tetap menjadi tantangan utama (Szekely et al., 2023; Wichaphian et al., 2023).

Literatur mengenai pupuk organik cair menegaskan bahwa respons tanaman terhadap input organik sangat bergantung pada komoditas, sistem budidaya, bahan baku, dan taraf aplikasi. POC meningkatkan serapan hara, pertumbuhan, dan hasil pada wortel serta daun bawang (Fahrurrozi et al., 2022), sedangkan POC limbah kulit nanas cenderung memperbaiki pertumbuhan okra pada konsentrasi menengah tetapi menurunkan pertumbuhan pada konsentrasi tertinggi (Seman & Adam, 2023). Pada kapas, POC yang dikombinasikan dengan pengurangan pupuk kimia memperbaiki pertumbuhan, akumulasi biomassa, struktur tajuk, dan fungsi fotosintetik (Shi et al., 2022; Liang et al., 2022; Shi et al., 2023). Temuan tersebut mendukung eksplorasi POC urine sapi, tetapi sekaligus memperingatkan bahwa peningkatan konsentrasi tidak selalu menghasilkan peningkatan pertumbuhan.

Urine sapi merupakan produk samping peternakan yang melimpah dan relevan untuk pertanian sirkular. *Biofertilizer* fermentasi berbasis kotoran dan urine sapi telah dikaitkan dengan fungsi mikroba terkait fiksasi nitrogen, mobilisasi hara, siderofor, dan produksi fitohormon (Walia et al., 2025). Bioinokulan tradisional seperti Jeevamrit dan Beejamrit juga dilaporkan memperbaiki pertumbuhan bayam pada kondisi cekaman garam dan kekeringan (Patel et al., 2024). Pupuk berbasis kotoran sapi mendukung performa selada pada hortikultura rumah kaca (Rubio et al., 2026), sedangkan kombinasi pupuk kandang sapi dan *biofertilizer* meningkatkan pertumbuhan okra pada sistem berbasis tanah (Aziz, 2023). Akan tetapi, hasil dari tanah tidak dapat langsung dialihkan ke hidroponik karena tanah menyediakan penyangga fisik, kimia, dan biologis, sedangkan pada hidroponik akar berinteraksi langsung dengan larutan.

Kajian lain mengenai *biofertilizer* dan formulasi organik memperlihatkan bahwa respons tanaman dipengaruhi oleh stabilitas bahan, media pembawa, mikroba fungsional, status air, dan interaksi dengan nutrisi mineral. Formulasi bakteri terenkapsulasi dapat memperpanjang umur simpan dan mengendalikan pelepasan bakteri (Kaur et al., 2023), sementara *biofertilizer* berbasis air beras terfermentasi dapat meningkatkan pertumbuhan pakcoy (Ahbar et al., 2024). Pada konteks tanah, pupuk organik cair turut memengaruhi sifat biologis dan fisik tanah (Moridi et al., 2021), interaksi pupuk guano padat dan POC memengaruhi pertumbuhan porang (Purnama et al., 2023), dan kompos Azolla dikembangkan sebagai bahan pertanian berkelanjutan (Thepsilvisut et al., 2024). Meta-analisis

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

lapangan juga menunjukkan bahwa *biofertilizer* dapat memengaruhi hasil, kualitas tanaman, dan sifat tanah, meskipun besarnya efek bergantung pada kondisi aplikasi (Pei et al., 2025).

Celah penelitian yang ditangani dalam studi ini adalah terbatasnya bukti kuantitatif mengenai POC urine sapi sebagai input hara pada hidroponik rakit apung untuk bayam. Pada sistem ini, kualitas larutan menentukan respons akar secara langsung Oleh karena itu, pertanyaan kunci bukan hanya apakah POC urine sapi bermanfaat, melainkan pada zona perlakuan mana input tersebut menghasilkan pertumbuhan terbaik.

Penelitian ini mengevaluasi enam perlakuan POC urine sapi yang terdiri dari tanpa POC urine sapi, pemberian POC urine sapi 30 ml/L air, 35 ml/L air, 40 ml/L air, 45 ml/L air, dan 50 ml/L air dengan lima ulangan. Tinggi tanaman, jumlah daun, dan lebar daun diamati pada 1, 2, dan 3 MST, sedangkan panjang akar diamati pada akhir penelitian. Tujuan penelitian adalah mengukur pengaruh perlakuan terhadap pertumbuhan vegetatif, mengidentifikasi perlakuan yang paling prospektif, dan membangun argumen berbasis data mengenai potensi POC urine sapi sebagai nutrisi lokal dan sirkular untuk bayam hidroponik rakit apung.

## METODE PENELITIAN

Percobaan ini merupakan studi kuantitatif satu faktor yang mengevaluasi perlakuan POC urine sapi pada bayam dalam sistem hidroponik rakit apung. Faktor perlakuan terdiri atas enam taraf berkode B0, B1, B2, B3, B4, dan B5. Perlakuan terdiri dari B0: kontrol, B1: pemberian POC urine sapi 30 ml/L air, B2: pemberian POC urine sapi 35 ml/L air, B3 : pemberian POC urine sapi 40 ml/L air, B4 : pemberian POC urine sapi 45 ml/L air dan B5 : pemberian POC urine sapi 50 ml/L air. Setiap perlakuan memiliki lima ulangan, sehingga terdapat 30 unit percobaan untuk setiap variabel dan waktu pengamatan.

Rancangan percobaan diperlakukan sebagai rancangan acak lengkap dengan perlakuan sebagai faktor tetap. Pelaksanaan penelitian hidroponik rakit apung ini dilaksanakan di dalam paranet (green house sederhana). Rancangan ini sesuai untuk percobaan hidroponik terkendali ketika unit percobaan relatif homogen. Hidroponik rakit apung dipilih karena memungkinkan kontak kontinu antara akar tanaman dan larutan nutrisi, sehingga relevan untuk menguji respons langsung tanaman terhadap formulasi hara cair.

Tanaman bayam dibudidayakan pada enam perlakuan POC urine sapi. Karena pupuk digunakan dalam larutan hidroponik, perlakuan ditafsirkan sebagai input pada tingkat larutan. Proses fermentasipada pembuatan pupuk organic cair (POC) urine sapi dilakukan dengan cara mencampur urine sapi dengan air, larutan gula dan menambahkan EM4. Cara aplikasinya dilakukan dengan menambahkan masing-masing perlakuan ke dalam boks hidroponik sesuai label dari masing-masing perlakuan setiap 1 (satu) minggu sekali.

Tinggi tanaman diukur pada 1, 2, dan 3 MST sebagai indikator vigor pucuk. Jumlah daun dihitung pada waktu yang sama sebagai indikator pembentukan organ panen. Lebar daun diukur dalam sentimeter untuk menggambarkan ekspansi tajuk. Panjang akar diukur pada pengamatan akhir sebagai indikator bawah tanah yang penting karena akar menjadi antarmuka langsung antara tanaman dan larutan.

Rerata, simpangan baku, dan galat baku dihitung untuk setiap perlakuan. ANOVA satu arah dilakukan secara terpisah untuk tinggi tanaman, jumlah daun, dan lebar daun pada setiap waktu

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

pengamatan serta untuk panjang akar akhir. Ukuran efek dinyatakan sebagai eta kuadrat, yaitu jumlah kuadrat perlakuan dibagi jumlah kuadrat total. Ambang signifikansi ditetapkan pada $\alpha = 0,05$. Gambar disajikan sebagai rerata ± galat baku, sedangkan tabel disusun untuk menampilkan nilai akhir dan ringkasan statistik utama.

Rancangan percobaan diperlakukan sebagai rancangan acak lengkap dengan perlakuan sebagai faktor tetap. Rancangan ini sesuai untuk percobaan hidroponik terkendali ketika unit percobaan relatif homogen dan pengacakan dapat mengurangi pengaruh posisi, pencahayaan, atau mikroklimat. Hidroponik rakit apung dipilih karena memungkinkan kontak kontinu antara akar tanaman dan larutan nutrisi, sehingga relevan untuk menguji respons langsung tanaman terhadap formulasi hara cair.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perlakuan POC urine sapi menghasilkan perbedaan pertumbuhan bayam yang kuat secara statistik. Respons tahap akhir tidak linear dari B0 sampai B5. B2 menghasilkan tinggi tanaman terbesar pada 3 MST, sedangkan B1 menghasilkan jumlah daun, lebar daun, dan panjang akar tertinggi. Pola ini menunjukkan adanya optimum spesifik-sifat dan bahwa perlakuan tertinggi berkode B5 tidak memberikan respons terbaik. Dengan demikian, penilaian keberhasilan POC urine sapi pada hidroponik bayam tidak dapat didasarkan pada satu sifat tanaman saja, tetapi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara vigor pucuk, pembentukan daun, ekspansi daun, dan perkembangan akar.

Tabel 1. Kinerja pertumbuhan akhir bayam pada perlakuan POC urine sapi.

| Perlakuan | Tinggi 3 MST (cm) | Jumlah daun 3 MST (helai tanaman−1) | Lebar daun 3 MST (cm) | Panjang akar (cm) |
|---|---|---|---|---|
| **B0** | 12,90 ± 0,65 | 6,00 ± 1,00 | 1,10 ± 0,14 | 11,46 ± 1,38 |
| **B1** | 14,90 ± 0,67 | 10,00 ± 1,00 | 2,60 ± 0,14 | 22,68 ± 7,03 |
| **B2** | 16,98 ± 0,41 | 8,80 ± 0,84 | 2,26 ± 0,25 | 19,96 ± 1,66 |
| **B3** | 16,72 ± 0,31 | 8,00 ± 1,00 | 2,00 ± 0,00 | 19,70 ± 1,40 |
| **B4** | 15,00 ± 0,89 | 7,20 ± 0,84 | 1,86 ± 0,22 | 17,54 ± 0,48 |
| **B5** | 13,26 ± 0,51 | 5,60 ± 0,55 | 1,16 ± 0,11 | 9,46 ± 1,95 |

*Keterangan. MST = minggu setelah tanam; B0–B5 adalah kode perlakuan dalam dataset percobaan.*

Tabel 2. Ringkasan ANOVA satu arah untuk variabel pertumbuhan bayam pada perlakuan POC urine sapi.

| Variabel | Waktu | F(5,24) | p-value | Eta kuadrat | Perlakuan terbaik |
|---|---|---|---|---|---|
| **Tinggi tanaman** | 1 MST | 8,36 | <0,001 | 0,635 | B2 |
| **Tinggi tanaman** | 2 MST | 27,69 | <0,001 | 0,852 | B2 |
| **Tinggi tanaman** | 3 MST | 39,19 | <0,001 | 0,891 | B2 |
| **Jumlah daun** | 1 MST | 5,65 | 0,001 | 0,541 | B2 |
| **Jumlah daun** | 2 MST | 19,83 | <0,001 | 0,805 | B1 |
| **Jumlah daun** | 3 MST | 17,97 | <0,001 | 0,789 | B1 |
| **Lebar daun** | 1 MST | 38,98 | <0,001 | 0,890 | B2 |
| **Lebar daun** | 2 MST | 62,16 | <0,001 | 0,928 | B2 |
| **Lebar daun** | 3 MST | 65,47 | <0,001 | 0,932 | B1 |
| **Panjang akar** | Akhir | 13,58 | <0,001 | 0,739 | B1 |

*Keterangan. Eta kuadrat menunjukkan proporsi variasi total yang dijelaskan oleh perlakuan.*

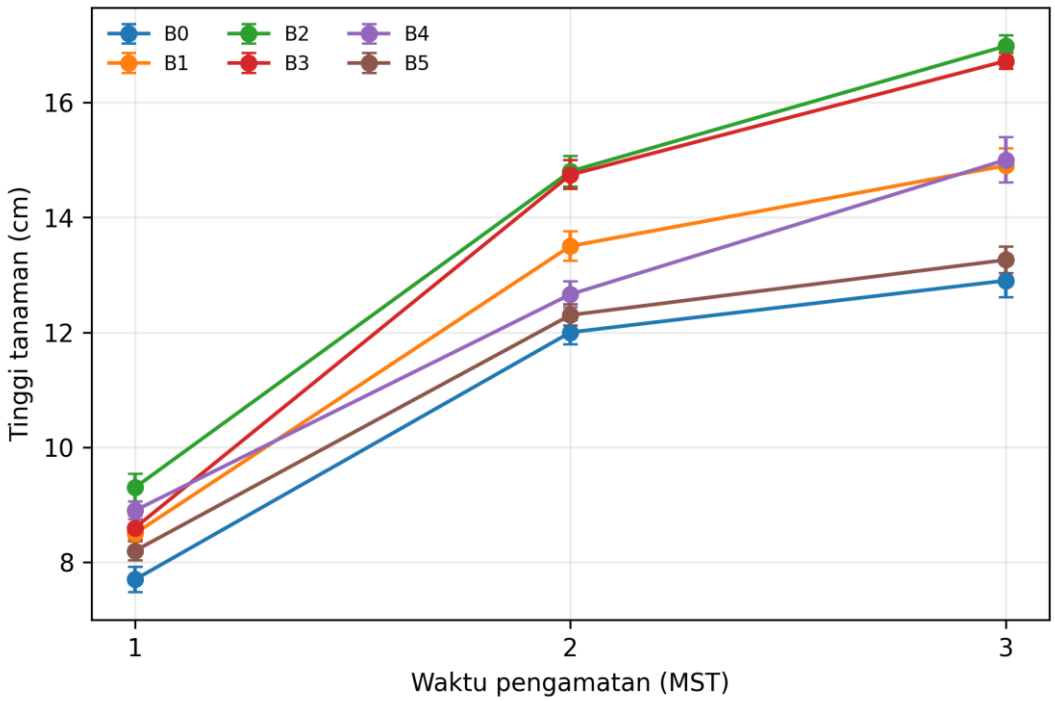
*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

Tinggi tanaman meningkat pada semua perlakuan, tetapi besar peningkatan bergantung pada identitas perlakuan. Pada 1 MST, B2 telah menghasilkan rerata tertinggi (9,30 cm). Pada 2 MST, B2 tetap tertinggi (14,80 cm), diikuti B3 (14,74 cm). Pada 3 MST, B2 mencapai 16,98 ± 0,41 cm, meningkat sekitar 31,6% dibanding B0. Efek perlakuan pada tinggi akhir sangat kuat ($F(5,24) = 39,19$; $p < 0,001$; eta kuadrat = 0,891).

Jumlah daun memberikan indikator lebih langsung terhadap pembentukan tajuk produktif. Pada 1 MST, B2 memiliki rerata jumlah daun tertinggi, tetapi pada 2 dan 3 MST posisi terbaik bergeser ke B1. Pada 3 MST, B1 menghasilkan 10,00 ± 1,00 helai tanaman−1, meningkat 66,7% dibanding B0. Efek perlakuan terhadap jumlah daun akhir signifikan dan kuat ($F(5,24) = 17,97$; $p < 0,001$; eta kuadrat = 0,789).

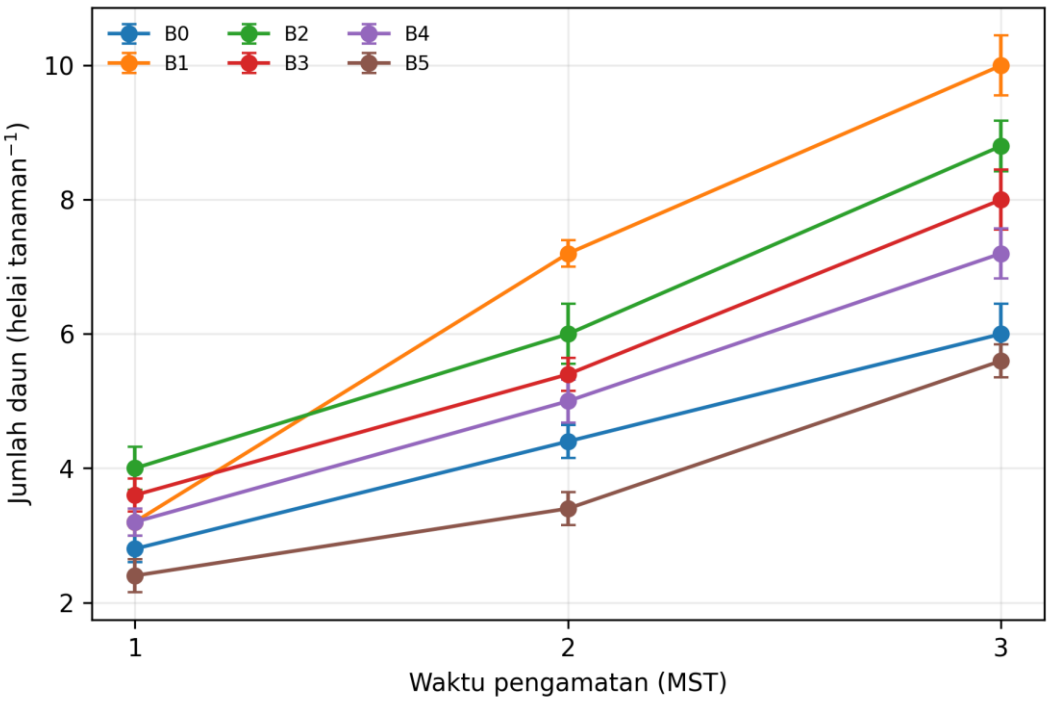
Lebar daun menunjukkan respons perlakuan paling kuat di antara variabel pucuk akhir. Pada 1 dan 2 MST, B2 memimpin respons lebar daun, tetapi pada 3 MST B1 menjadi perlakuan terbaik dengan 2,60 ± 0,14 cm. Nilai ini lebih dari dua kali lipat B0 (1,10 ± 0,14 cm). Efek perlakuan sangat besar ($F(5,24) = 65,47$; $p < 0,001$; eta kuadrat = 0,932), menunjukkan bahwa POC urine sapi memengaruhi ekspansi tajuk secara nyata.

Panjang akar memperkuat interpretasi bahwa pengaruh perlakuan tidak terbatas pada bagian atas tanaman. B1 menghasilkan akar terpanjang (22,68 ± 7,03 cm), disusul B2 dan B3. Dibandingkan B0, B1 meningkatkan panjang akar sekitar 97,9%. Sebaliknya, B5 menghasilkan akar lebih pendek daripada B0. Efek perlakuan tetap signifikan dan kuat ($F(5,24) = 13,58$; $p < 0,001$; eta kuadrat = 0,739).

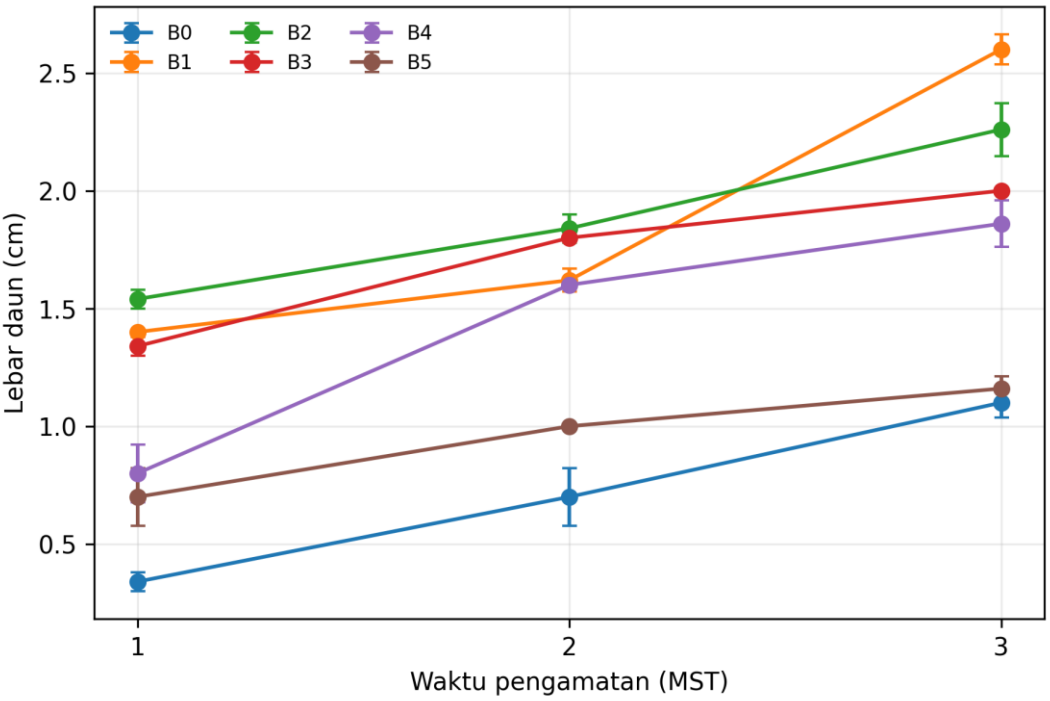



Gambar 1. Lintasan tinggi tanaman bayam pada enam perlakuan POC urine sapi.

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

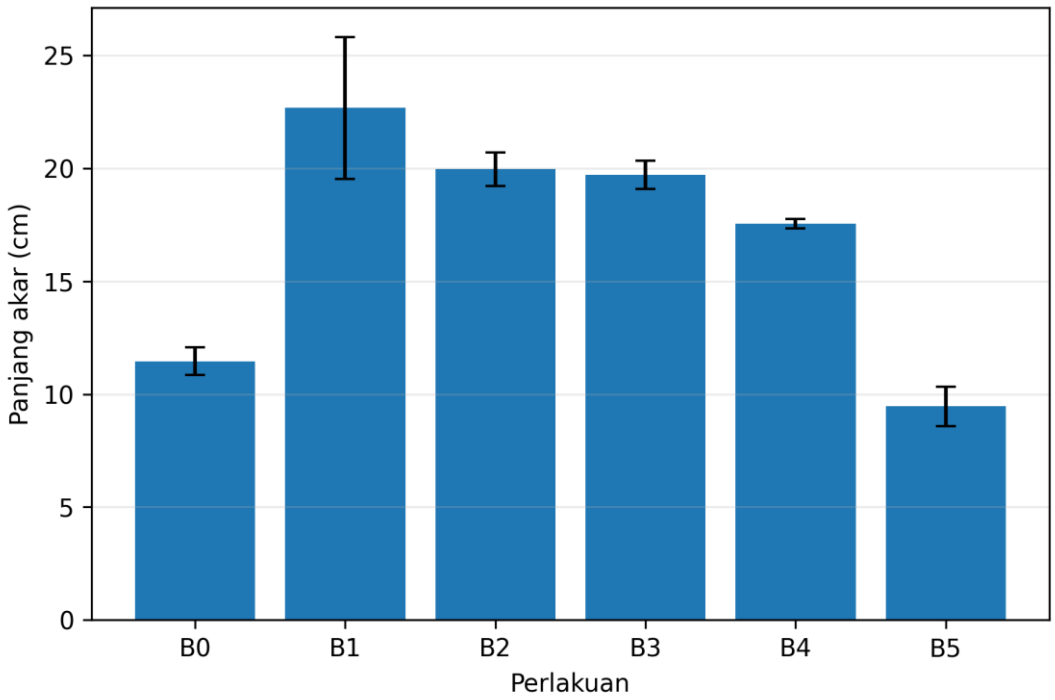



Gambar 2. Lintasan jumlah daun bayam pada enam perlakuan POC urine sapi.




Gambar 3. Lintasan lebar daun bayam pada enam perlakuan POC urine sapi.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.




Gambar 4. Panjang akar akhir bayam pada enam perlakuan POC urine sapi.

Temuan ini menunjukkan bahwa POC urine sapi secara substansial memengaruhi pertumbuhan bayam pada hidroponik rakit apung. Kontribusi utama studi bukan hanya membuktikan adanya efek perlakuan, tetapi memperlihatkan bahwa efek tersebut bersifat tidak linear. Perlakuan B1 dan B2, bukan B5, menghasilkan respons paling kuat. Pola ini sejalan dengan bukti bahwa pupuk organik cair dan input biologis sering bekerja optimal pada kisaran aplikasi tertentu. POC kulit nanas, misalnya, cenderung memperbaiki pertumbuhan okra pada konsentrasi menengah tetapi menurunkan pertumbuhan pada konsentrasi tertinggi (Seman & Adam, 2023). Input mikroorganisme lokal berbasis bonggol pisang pada pak choi juga menunjukkan pentingnya optimasi dosis ketika dikombinasikan dengan pengurangan pupuk NPK (Purba et al., 2026).

Respons penelitian ini juga konsisten dengan studi pada bayam dan sayuran daun. Hidrolisat bulu ayam meningkatkan indikator pertumbuhan bayam pada konsentrasi tertentu (Stanly & Umesh, 2024; Saleem et al., 2025), POC limbah ikan meningkatkan pertumbuhan dan akumulasi mineral bayam pada taraf aplikasi yang sesuai (Parveen et al., 2026), dan *biofertilizer* VP3 dengan kompos memengaruhi hasil serta kualitas bayam merah dan hijau (Arfarita et al., 2024). Meski penelitian tersebut tidak menguji urine sapi pada hidroponik, semuanya mendukung plausibilitas biologis bahwa sumber nutrisi organik dapat meningkatkan pertumbuhan bayam jika formulasi dan tarafnya sesuai.

Keunikan studi ini terletak pada evaluasi input cair turunan ternak dalam lingkungan hidroponik. Urine sapi bersifat cair, mudah tersedia di wilayah peternakan, dan berpotensi kaya senyawa hara terlarut. Namun sifat yang sama dapat menimbulkan risiko apabila konsentrasi tidak sesuai. Pada hidroponik, akar tidak memperoleh penyangga seperti di tanah. Karena itu, mutu larutan, termasuk pH, konduktivitas listrik, oksigen terlarut, dan bentuk nitrogen, menjadi sangat penting. Studi bioponik berbasis kotoran ayam dan kambing pada selada menunjukkan bahwa bahan organik lokal dapat digunakan, tetapi proses mineralisasi dan kehilangan nitrogen harus dikelola (Szekely et al., 2023).

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

B2 memaksimalkan tinggi tanaman, sehingga perlakuan tersebut tampaknya menyediakan kondisi yang mendukung vigor vertikal. Namun, tinggi tanaman saja bukan indikator terbaik untuk bayam karena organ panen utamanya adalah daun. Perbedaan antara B2 sebagai perlakuan terbaik untuk tinggi dan B1 sebagai perlakuan terbaik untuk jumlah daun, lebar daun, serta panjang akar merupakan hasil yang penting. Pada sayuran daun, pembentukan daun dan ekspansi helaian lebih dekat dengan nilai panen dibanding pemanjangan tanaman. Oleh sebab itu, B1 dapat dianggap lebih relevan untuk arah produksi daun, sedangkan B2 tetap penting sebagai perlakuan yang mendukung vigor pucuk.

Respons lebar daun merupakan bukti agronomis paling kuat karena B1 meningkatkan lebar daun akhir sekitar 136,4% dibanding B0. Lebar daun mencerminkan ekspansi permukaan fotosintetik dan potensi pembentukan biomassa. Literatur POC pada kapas menunjukkan bahwa pupuk organik cair dapat memperbaiki luas daun, kandungan klorofil, efisiensi fotosistem, struktur tajuk, dan fungsi fotosintetik ketika dipadukan dengan pengurangan pupuk kimia (Liang et al., 2022; Shi et al., 2023). Walaupun komoditasnya berbeda, studi tersebut memperkuat pentingnya sifat daun sebagai indikator keberhasilan manajemen hara.

Respons akar memperkuat argumen bahwa B1 menciptakan lingkungan larutan yang lebih seimbang. Akar B1 hampir dua kali lebih panjang dibanding B0 dan jauh lebih panjang dibanding B5. Dalam hidroponik rakit apung, akar merupakan antarmuka utama penyerapan air dan hara sehingga pertumbuhan akar memiliki implikasi langsung terhadap kemampuan tanaman memanfaatkan larutan. Literatur *biofertilizer* sering menempatkan respons akar sebagai mekanisme penting, baik melalui bakteri pemacu pertumbuhan, fiksasi nitrogen, produksi IAA, ACC deaminase, maupun pelarutan hara (Petrillo et al., 2022; Riddech et al., 2022; Tor et al., 2022).

**Mekanisme Respons Tanaman terhadap Taraf POC Urine Sapi**

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa respons pertumbuhan bayam terhadap POC urine sapi bersifat tidak linear. Peningkatan konsentrasi dari B0 sampai B2 memperbaiki sebagian besar parameter pertumbuhan, tetapi respons kemudian menurun pada B3–B5. Pola ini menunjukkan adanya kisaran konsentrasi optimum ketika ketersediaan hara dan kondisi fisik-kimia larutan berada pada tingkat yang mendukung aktivitas akar. Sebaliknya, peningkatan konsentrasi melewati kisaran tersebut diduga mengubah keseimbangan larutan sehingga membatasi pertumbuhan tanaman. Respons dosis yang tidak linear juga ditemukan pada penggunaan POC kulit nanas, ketika konsentrasi menengah cenderung mendukung pertumbuhan okra, sedangkan konsentrasi tertinggi menurunkan parameter pertumbuhan (Seman & Adam, 2023).

Secara biologis, keunggulan B1 dan B2 kemungkinan berkaitan dengan meningkatnya ketersediaan unsur hara terlarut yang dibutuhkan untuk pembelahan, pemanjangan, dan diferensiasi sel. POC urine sapi berpotensi menyediakan nitrogen, kalium, fosfor, serta senyawa organik dan metabolit hasil fermentasi. Nitrogen mendukung pembentukan protein, enzim, klorofil, dan jaringan vegetatif, sedangkan kalium berperan dalam pengaturan tekanan osmotik, pembukaan stomata, translokasi fotosintat, dan ekspansi sel. Fosfor berhubungan dengan transfer energi, pembentukan akar, dan metabolisme sel. Pada konsentrasi 30–35 ml/L air, kombinasi unsur tersebut diduga berada pada tingkat yang cukup tersedia tanpa menimbulkan tekanan berlebihan pada sistem perakaran.

Proses fermentasi menggunakan EM4, sumber gula, dan air juga dapat meningkatkan penguraian bahan organik menjadi bentuk yang lebih sederhana. Proses tersebut berpotensi menghasilkan

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

senyawa yang lebih mudah dimineralisasi serta melibatkan mikroorganisme dengan fungsi pemacuan pertumbuhan. Literatur mengenai pupuk hayati berbasis kotoran dan urine sapi menunjukkan adanya fungsi mikroba yang berkaitan dengan siklus nitrogen, mobilisasi unsur hara, produksi siderofor, dan pembentukan senyawa pemacu pertumbuhan (Walia et al., 2025). Mikroorganisme pemacu pertumbuhan juga dapat menghasilkan indole-3-acetic acid atau senyawa serupa auksin yang merangsang pembentukan dan pemanjangan akar. Mekanisme tersebut memberikan penjelasan biologis yang masuk akal terhadap panjang akar B1 yang hampir dua kali lebih besar daripada kontrol.

Akar yang lebih panjang pada B1 memperluas permukaan kontak tanaman dengan larutan dan meningkatkan peluang penyerapan air serta unsur hara. Dalam sistem rakit apung, akar menjadi satu-satunya antarmuka utama antara tanaman dan larutan nutrisi. Oleh sebab itu, perbaikan perkembangan akar dapat segera memengaruhi pembentukan daun dan ekspansi helaian. Hubungan ini terlihat pada B1 yang secara bersamaan menghasilkan akar terpanjang, jumlah daun terbanyak, dan daun terlebar. Peningkatan luas permukaan daun memperbesar kapasitas intersepsi cahaya dan fotosintesis, sehingga lebih banyak fotosintat dapat dihasilkan untuk mendukung pembentukan biomassa vegetatif. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa pupuk organik cair dapat memperbaiki luas daun, kandungan klorofil, efisiensi fotosistem, dan fungsi fotosintetik tanaman apabila diberikan pada taraf yang sesuai (Liang et al., 2022; Shi et al., 2023).

Perbedaan antara B1 dan B2 menunjukkan bahwa setiap sifat tanaman dapat memiliki titik optimum fisiologis yang berbeda. B2 menghasilkan tanaman tertinggi, sedangkan B1 menghasilkan jumlah daun, lebar daun, dan panjang akar tertinggi. Pada B2, ketersediaan nitrogen dan senyawa pemacu pertumbuhan yang sedikit lebih tinggi mungkin lebih mendorong pemanjangan batang dan ekspansi vertikal. Sebaliknya, kondisi larutan pada B1 tampaknya lebih mendukung pembagian biomassa yang seimbang antara akar dan tajuk serta pembentukan organ daun. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya perubahan pola alokasi biomassa. Tanaman pada B2 kemungkinan mengalokasikan proporsi sumber daya yang lebih besar untuk pemanjangan pucuk, sedangkan tanaman pada B1 mengalokasikan sumber daya secara lebih merata untuk perkembangan akar, pembentukan daun baru, dan pelebaran helaian.

Bagi tanaman bayam yang dipanen bagian vegetatifnya, jumlah dan ukuran daun lebih dekat dengan nilai agronomis daripada tinggi tanaman semata. Tanaman yang tinggi belum tentu menghasilkan biomassa daun paling besar apabila pemanjangan batang tidak disertai peningkatan jumlah dan luas daun. Dengan demikian, B1 secara agronomis lebih prospektif untuk produksi bayam daun, sedangkan B2 menunjukkan potensi untuk meningkatkan vigor pucuk. Namun, penetapan perlakuan terbaik secara final tetap memerlukan pengukuran bobot segar, bobot kering, luas daun total, dan indeks panen.

Penurunan pertumbuhan pada B3, B4, dan terutama B5 dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme teknis yang khas pada larutan organik. Peningkatan konsentrasi POC dapat meningkatkan jumlah ion dan bahan terlarut sehingga menaikkan konduktivitas listrik larutan. Konduktivitas listrik yang terlalu tinggi menurunkan potensial air di sekitar akar dan meningkatkan energi yang dibutuhkan tanaman untuk menyerap air. Kondisi tersebut dapat menimbulkan tekanan osmotik, mengurangi pembesaran sel, dan membatasi ekspansi daun. Pola ini konsisten dengan lebar daun dan jumlah daun B5 yang hampir sama atau lebih rendah daripada kontrol.

Konsentrasi POC yang tinggi juga berpotensi meningkatkan proporsi nitrogen dalam bentuk amonium atau amonia. Pada konsentrasi terbatas, amonium dapat dimanfaatkan sebagai sumber

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

nitrogen. Namun, apabila terakumulasi, bentuk nitrogen tersebut dapat mengganggu keseimbangan ion, menekan penyerapan kation lain, mengubah pH di sekitar akar, dan menyebabkan toksisitas. Gejala tersebut dapat tampak dalam bentuk pertumbuhan akar yang pendek, pembentukan daun yang terbatas, dan penurunan vigor. Panjang akar B5 yang lebih rendah daripada B0 mendukung dugaan bahwa lingkungan larutan pada konsentrasi tertinggi kurang sesuai bagi perkembangan akar.

Mekanisme lain yang mungkin terlibat adalah penurunan oksigen terlarut. POC urine sapi hasil fermentasi masih dapat membawa bahan organik terlarut dan populasi mikroorganisme. Pada larutan yang lebih pekat, mikroorganisme heterotrof menggunakan oksigen untuk menguraikan senyawa organik. Karena akar pada sistem rakit apung terendam secara terus-menerus, peningkatan respirasi mikroba dapat menurunkan oksigen yang tersedia bagi respirasi akar. Kekurangan oksigen membatasi produksi energi di jaringan akar, menghambat transportasi aktif unsur hara, dan menekan pembentukan akar baru. Studi bioponik menunjukkan bahwa penggunaan bahan organik dalam larutan hidroponik memungkinkan produksi tanaman, tetapi mineralisasi, stabilitas nitrogen, dan pengelolaan kualitas larutan menjadi faktor kritis (Szekely et al., 2023).

Meskipun mekanisme tersebut sesuai dengan pola data, penelitian ini belum mengukur pH, konduktivitas listrik, oksigen terlarut, kandungan amonium dan nitrat, kebutuhan oksigen biologis, serta populasi mikroba. Oleh karena itu, hubungan sebab-akibat belum dapat dipastikan. Interpretasi mekanistik perlu dinyatakan sebagai dugaan ilmiah yang harus diverifikasi melalui pengukuran kimia dan biologis larutan pada penelitian lanjutan.

**Implikasi bagi Penerapan Hidroponik Rakit Apung**

Secara teknis, hasil penelitian menunjukkan bahwa POC urine sapi tidak dapat diaplikasikan berdasarkan prinsip semakin tinggi dosis semakin baik. Sistem rakit apung memberikan kontak kontinu antara akar dan larutan, sehingga perubahan kecil dalam konsentrasi dapat memengaruhi tanaman. Kisaran 30–35 ml/L air merupakan zona aplikasi paling prospektif dalam kondisi penelitian ini. Konsentrasi 30 ml/L lebih sesuai apabila sasaran utama adalah pembentukan daun dan perkembangan akar, sedangkan 35 ml/L dapat dipertimbangkan apabila sasaran budidaya menekankan vigor dan tinggi tanaman.

Namun, hasil tersebut belum cukup untuk merekomendasikan POC urine sapi sebagai pengganti penuh nutrisi hidroponik komersial. Larutan AB mix memiliki komposisi unsur hara yang lebih terukur dan sebagian besar unsur tersedia dalam bentuk mineral yang langsung dapat diserap. Sebaliknya, komposisi POC dipengaruhi oleh pakan ternak, kondisi fisiologis sapi, lama penyimpanan urine, bahan tambahan fermentasi, populasi mikroorganisme, lama fermentasi, dan metode penyaringan. Karena variasi tersebut, posisi POC urine sapi yang lebih realistis adalah sebagai kandidat nutrisi alternatif atau substitusi parsial yang masih perlu distandardisasi.

**Implikasi bagi Pertanian Berkelanjutan dan Ekonomi Sirkular**

Pemanfaatan urine sapi sebagai bahan POC memiliki relevansi kuat terhadap pertanian sirkular karena mengubah produk samping peternakan menjadi input produksi tanaman. Di wilayah yang memiliki usaha peternakan dan hortikultura, pendekatan tersebut dapat menghubungkan dua subsektor yang sebelumnya terpisah. Urine yang berpotensi menjadi limbah dapat difermentasi dan dimanfaatkan sebagai sumber hara, sehingga mengurangi kehilangan nutrien ke lingkungan sekaligus menekan kebutuhan pembelian input dari luar.

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

Bagi rumah tangga, sekolah, kelompok tani, dan petani kecil, penggunaan bahan baku lokal berpotensi mengurangi biaya produksi hidroponik dan meningkatkan kemandirian input H.idroponik sistem rakit apung juga relatif sederhana dan dapat diterapkan pada ruang terbatas. Kombinasi antara hidroponik hemat lahan dan pupuk organik berbasis limbah lokal dapat mendukung produksi sayuran dekat konsumen, memperpendek rantai distribusi, dan meningkatkan akses terhadap sayuran segar. Meskipun demikian, penggunaan yang berlebihan juga dapat meningkatkan pembuangan larutan kaya nitrogen ke lingkungan.

Aspek keamanan pangan juga perlu mendapat perhatian karena bayam dikonsumsi sebagai sayuran daun. POC urine sapi dapat berkembang dari pupuk buatan lokal yang sangat bervariasi menjadi produk nutrisi organik yang lebih murah biayanya. Pengembangan teknologi selanjutnya dapat diarahkan pada sistem hibrida, yaitu mengombinasikan POC urine sapi dengan sebagian nutrisi mineral.

Keterbatasan utama studi ini adalah belum adanya data kimia larutan, biomassa, dan mutu produk. Selain itu juga didak ada data pH, EC, nitrogen amonium/nitrat, fosfor, kalium, oksigen terlarut, dan populasi mikroba. Meski demikian, bukti statistik menunjukkan efek perlakuan yang besar dan konsisten, dengan eta kuadrat semua sifat akhir di atas 0,7. Artinya, identitas perlakuan menjelaskan sebagian besar variasi pertumbuhan yang diamati. Dengan penambahan data kimia dan biomassa pada penelitian berikutnya, POC urine sapi diharapkan berpotensi menjadi tambahan input hidroponik lokal yang lebih murah biayanya.

Untuk penerapan praktis, POC urine sapi perlu diproses dengan cara difermentasi. Pada proses fermentasi ini mencampurkan bahan baku yaitu urine sapi ditambah dengan air, larutan gula dan EM4 secara merata. Setiap hari tutup wadah larutan dibuka dan diaduk merata, lalu ditutup kembali dan didiamkan selama 2 minggu. Temuan ini juga sejalan dengan studi yang menunjukkan bahwa *biofertilizer*, biol, dan pupuk organik berbasis mikroba memerlukan kontrol proses agar manfaatnya konsisten pada kondisi budidaya yang berbeda (Yépez et al., 2025; Ahbar et al., 2024; Kaur et al., 2023).

Secara keseluruhan, hasil penelitian mendukung POC urine sapi sebagai kandidat input sirkular untuk hidroponik bayam, tetapi keberhasilannya bergantung pada optimasi konsentrasi dan pengelolaan kualitas larutan. B1–B2 memberikan zona biologis yang paling menjanjikan, sedangkan penurunan pada B5 menunjukkan adanya batas toleransi sistem. Dengan fermentasi yang terstandar, POCurine sapi berpotensi menjadi bagian dari sistem hidroponik yang lebih lokal, adaptif, dan berkelanjutan. Dengan demikian, peneliti tidak menempatkan POC urine sapi sebagai pengganti langsung larutan AB mix atau nutrisi mineral komersial, namun sebagai kandidat nutrisi sirkular yang perlu dioptimasi.

## KESIMPULAN

POC urine sapi berpengaruh nyata terhadap pertumbuhan bayam pada sistem hidroponik rakit apung. Efek perlakuan tampak pada tinggi tanaman, jumlah daun, lebar daun, dan panjang akar, dengan ukuran efek yang besar. B2 (pemberian POC urine sapi 35 ml/L air) menghasilkan tinggi tanaman terbesar pada 3 MST, sedangkan B1 (pemberian POC urine sapi 30 ml/L air) menghasilkan jumlah daun tertinggi, lebar daun terbesar, dan akar terpanjang. Respons tersebut menunjukkan bahwa POC urine sapi mendukung perkembangan pucuk dan akar, tetapi optimum pertumbuhan berbeda menurut sifat tanaman. Temuan utama penelitian ini adalah respons yang tidak linear: pertumbuhan terbaik terkonsentrasi pada B1–B2, sedangkan B5 (pemberian POC urine sapi 50 ml/L air) konsisten lebih

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

lemah. Oleh karena itu, penggunaan POC urine sapi pada hidroponik bayam tidak boleh diarahkan pada aplikasi maksimum, melainkan pada pengenceran dan pengelolaan mutu larutan yang terkalibrasi.

## DAFTAR PUSTAKA

Ahbar, A. I., Othman, N. M. I., Shamsuddin, A. S., & Sari, N. A. (2024). Pelletized plant growth-promoting bacteria derived from fermented rice water and its influence in pakchoy growth enhancement. *Jurnal Teknologi*, *86*(6), 69–76. https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v86.21087

Arfarita, N., Masyhuri, M., Sugiarto, S., & Higuchi, T. (2024). The effect of VP3 *biofertilizer* and compost application on red spinach (Amaranthus dubius) and green spinach (Amaranthus viridis) yield and quality. *Journal of Tropical Life Science*, *14*(1), 27–38. https://doi.org/10.11594/jtls.14.01.04

Aziz, H. H. (2023). Effect of organic and bio-fertilizers on okra plant growth. *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*, *11*(2), 243–250. https://doi.org/10.22194/JGIAS/23.1041

Fahrurrozi, F., Muktamar, Z., Setyowati, N., & Sudjatmiko, S. (2022). Liquid organic fertilizer increased nutrient uptakes, growth and yields of organically grown carrot and green onion. *Asian Journal of Plant Sciences*, *21*(4), 707–715. https://doi.org/10.3923/ajps.2022.707.715

Kaur, R., Kaur, S., Dwibedi, V., Kaur, C., Akhtar, N., & Alzahrani, A. (2023). Development and characterization of rice bran-gum Arabic based encapsulated *biofertilizer* for enhanced shelf life and controlled bacterial release. *Frontiers in Microbiology*, *14*, Article 1267730. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1267730

Liang, Q., Shi, X., Li, N., Shi, F., Tian, Y., Zhang, H., Hao, X., & Luo, H. (2022). Fertilizer reduction combined with organic liquid fertilizer improved canopy structure and function and increased cotton yield. *Agronomy*, *12*(8), Article 1759. https://doi.org/10.3390/agronomy12081759

Moridi, A., Zarei, M., Moosavi, A. A., & Ronaghi, A. (2021). Effect of liquid organic fertilizers and soil moisture status on some biological and physical properties of soil. *Polish Journal of Soil Science*, *54*(1), 41–58. https://doi.org/10.17951/pjss.2021.54.1.41-58

Parveen, Masood, Z., Batool, H., Riaz, A., Ali, W., Khan, W., Kabir, M., Aslam, M., & Said, M. B. (2026). Impact of trace metals in fish waste-based organic fertilizer on growth promotion and nutritional components of spinach plant (Spinacia oleracea L.). *Scientific Reports*, *16*(1), Article 10238. https://doi.org/10.1038/s41598-026-41171-5

Patel, M., Islam, S., Glick, B. R., Choudhary, N., Yadav, V. K., Bagatharia, S., Sahoo, D. K., & Patel, A. (2024). Zero budget natural farming components Jeevamrit and Beejamrit augment Spinacia oleracea L. growth by ameliorating salt and drought stress. *Frontiers in Microbiology*, *15*, Article 1326390. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1326390

Pei, B., Liu, T., Xue, Z., Cao, J., Zhang, Y., Yu, M., Liu, E., Xing, J., Wang, F., Ren, X., & Zhang, Z. (2025). Effects of *biofertilizer* on yield and quality of crops and properties of soil under field conditions in China: A meta-analysis. *Agriculture*, *15*(10), Article 1066. https://doi.org/10.3390/agriculture15101066

Petrillo, C., Vitale, E., Ambrosino, P., Arena, C., & Isticato, R. (2022). Plant growth-promoting bacterial consortia as a strategy to alleviate drought stress in Spinacia oleracea. *Microorganisms*, *10*(9), Article 1798. https://doi.org/10.3390/microorganisms10091798

Purba, J. H., Suarmika, I. G. M., & Prabawa, P. S. (2026). Optimizing banana corm-based local microorganisms for reduced NPK fertilization in pak choi (Brassica rapa). *Asian Journal of Agriculture*, *10*(1), Article g10014. https://doi.org/10.13057/asianjagric/g100145

Purnama, I., Mutryarny, E., & Wijaya, R. T. (2023). Advancing porang growth in red-yellow podzolic soils: An experimental analysis of solid guano and liquid organic fertilizer interaction. *Idesia*, *41*(3), 9–14. https://doi.org/10.4067/S0718-34292023000300009

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*

Riddech, N., Ma, N. Y., Ho, P. N., & Sarin, P. (2022). A plant growth promoting of rhizobacteria and endophytic bacteria in vegetable rhizosphere and root samples. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *16*(3), 1909–1921. https://doi.org/10.22207/JPAM.16.3.38

Rubio, R., Pérez Espinosa, A., Martínez-Sabater, E., Orden, L., Velamazán Ros, M., de Silva Alves, L., Sánchez-Méndez, S., Andreu-Rodríguez, F. J., Sáez-Tovar, J. A., & Moral, R. (2026). Validation of compost-derived *biofertilizer* s from cattle manure in lettuce cultivation using multispectral imaging and vegetation indices. *Applied Sciences*, *16*(10), Article 4644. https://doi.org/10.3390/app16104644

Saleem, I., Asad, W., Kiran, T., Asad, S. B., Khaliq, S., Al-Harethi, A. A. M., Mallasiy, L. O., & Shah, T. A. (2025). Enhancing spinach growth with a *biofertilizer* derived from chicken feathers using a keratinolytic bacterial consortium. *BMC Microbiology*, *25*(1), Article 207. https://doi.org/10.1186/s12866-025-03866-z

Seman, N. A., & Adam, S. (2023). The effect of pineapple peel wastes as liquid organic fertiliser on growth character of okra (Abelmoschus esculentus L.). *Food Research*, *7*, 70–77. https://doi.org/10.26656/fr.2017.7(S2).7

Shi, X. J., Hao, X. Z., Li, N. N., Li, J. H., Shi, F., Han, H. Y., Tian, Y., Chen, Y., Wang, J., & Luo, H. H. (2022). Organic liquid fertilizer coupled with single application of chemical fertilization improves growth, biomass, and yield components of cotton under mulch drip irrigation. *Frontiers in Plant Science*, *12*, Article 763525. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.763525

Shi, X., Hao, X., Khan, A., Li, N., Li, J., Shi, F., Tian, Y., Nepal, J., Wang, J., & Luo, H. (2023). Increase in cotton yield through improved leaf physiological functioning under reduced chemical fertilization compensated by enhanced organic liquid fertilization. *Frontiers in Plant Science*, *14*, Article 1225939. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1225939

Stanly, L. M., & Umesh, M. (2024). Effect of chicken feather hydrolysate on growth of spinach through soil amendment method: Unraveling a potential liquid *biofertilizer*. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, *18*(3), 2085–2094. https://doi.org/10.22207/JPAM.18.3.58

Szekely, I., Zeaiter, Z., & Jijakli, M. H. (2023). Development of a simple bioponic method using manure and offering comparable lettuce yield than hydroponics. *Water*, *15*(13), Article 2335. https://doi.org/10.3390/w15132335

Thepsilvisut, O., Srikan, N., Chutimanukul, P., Marubodee, R., & Ehara, H. (2024). Developing guidelines for Azolla microphylla production as compost for sustainable agriculture. *Resources*, *13*(11), Article 158. https://doi.org/10.3390/resources13110158

Tor, X. Y., Toh, W. K., Loh, P. C., & Wong, H. L. (2022). Isolation of bacteria with plant growth-promoting activities from a foliar *biofertilizer*. *Malaysian Journal of Microbiology*, *18*(3), 315–321. https://doi.org/10.21161/mjm.211365

Walia, A., Selvarajan, R., Ogola, H. J. O., Chauhan, R., Bala, J., Verma, S. K., & Kumar, R. (2025). Genome-resolved analysis of traditional fermented *biofertilizer* s as scalable solutions for soil restoration. *Frontiers in Microbiology*, *16*, Article 1725475. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1725475

Wichaphian, A., Sriket, N., Sensupa, S., Pekkoh, J., Pathom-aree, W., Chromkaew, Y., Suwannarach, N., Kumla, J., Cheirsilp, B., & Srinuanpan, S. (2023). Value-added green biorefinery co-products from ultrasonically assisted DES-pretreated Chlorella biomass. *Ultrasonics Sonochemistry*, *100*, Article 106628. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106628

Yépez, K. C. M., Freile, M. F. M., Saltos, G. Y. B., & Cifuentes, B. E. S. (2025). Microbiological evaluation of a biol produced with mountain native microorganisms and its effect on Chinese cabbage cultivation under deficit irrigation conditions. *Acta Agronomica*, *73*(2), 177–189. https://doi.org/10.15446/acag.v73n2.118289

*Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.*