



AGROPROSS
National Conference
Proceedings of Agriculture

Prosiding
Seminar dan Bimbingan Teknis Pertanian Politeknik Negeri Jember 2025
SMART AGRICULTURE : Akselerasi Program Prioritas Nasional Melalui Optimalisasi Produksi Pertanian
4-5 Juni 2025

Publisher:
Agropross, National Conference Proceedings of Agriculture
E-ISSN: 2964-0172
DOI:

Optimasi Tinggi Genangan Berbasis Tahapan pada Sistem Irigasi Bawah Permukaan SIEVAPET untuk Selada Keriting pada Berbagai Media Tanam Ultisol

Stage-Based Optimization of Ponding Depth in the SIEVAPET Subsurface Irrigation System for Curly Lettuce Grown in Various Ultisol-Based Media Optimization of Lodging Height based on Steps on Irrigated Rice

Author(s): Hilda Agustina*, Mardila, Edward Saleh, Primayoga Harsana Setyaaji

Program Studi Teknik Pertanian, Departemen Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya
*Corresponding author: hildaagustina@fp.unsri.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kedalaman muka air berbasis tahapan pertumbuhan pada budidaya selada keriting (*Lactuca sativa*) menggunakan sistem irigasi evapotranspirasi bawah permukaan (SIEVAPET). Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan air selada yang tinggi serta sensitivitasnya terhadap defisit air dan kejenuhan berlebih, yang dapat menyebabkan hipoksia pada akar. Percobaan terkendali dilakukan dengan menerapkan beberapa perlakuan kedalaman muka air pada setiap tahap pertumbuhan tanaman. Pengamatan didukung oleh pemantauan kelembapan zona perakaran menggunakan sensor dan/atau tensiometer, serta penjadwalan irigasi berdasarkan evapotranspirasi tanaman ($ET_c = ET_o \times K_c$). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian muka air secara stabil sangat penting untuk mempertahankan kelembapan zona perakaran pada kisaran optimal di bawah fluktuasi evapotranspirasi harian. Pola distribusi kelembapan secara vertikal dan horizontal sangat dipengaruhi oleh komposisi media tanah-pasir, sehingga berpengaruh terhadap keseragaman kelembapan dan risiko perkolasi dalam. Pertumbuhan dan hasil segar selada meningkat pada ambang kelembapan yang optimal, tetapi menurun pada kondisi defisit air maupun genangan ringan. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa integrasi pengelolaan muka air berbasis tahapan pertumbuhan dengan penjadwalan irigasi berbasis evapotranspirasi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air sekaligus mempertahankan produktivitas, dengan syarat keseimbangan antara hasil, efisiensi penggunaan air, dan risiko genangan dikelola secara cermat.

Kata Kunci:

evapotranspirasi,
irigasi bawah permukaan,
kelembaban tanah,
pengendalian muka air,
zona perakaran,

Keywords:

evapotranspirasi,
irigasi bawah permukaan,
kelembaban tanah,
pengendalian muka air,
zona perakaran,

ABSTRACT

*This study aimed to optimize stage-based water table depth for lettuce (*Lactuca sativa*) cultivation under a subsurface evapotranspiration irrigation system (SIEVAPET). The research was motivated by lettuce's high-water demand and strong sensitivity to both water deficit and excessive saturation, which may induce root hypoxia. A controlled experiment was conducted by applying different water table depth treatments across growth stages, supported by root-zone moisture monitoring using sensors and/or tensiometers and irrigation scheduling based on crop evapotranspiration ($ET_c = ET_o \times K_c$). The results indicate that stable water table control is essential to maintain near-optimal root-zone moisture under daily ET fluctuations. Vertical-horizonal moisture distribution patterns were strongly affected by soil-sand media composition, influencing moisture uniformity and deep percolation risks. Lettuce growth performance and fresh yield improved under optimal moisture thresholds but declined under deficit conditions or mild waterlogging. Overall, the findings confirm that integrating stage-based water table management with ET-based scheduling can enhance water use efficiency while sustaining productivity, provided that the trade-off between yield, WUE, and waterlogging risk is carefully managed.*



PENDAHULUAN

Budidaya lettuce (*Lactuca sativa*) merupakan salah satu subsektor hortikultura bernilai ekonomi tinggi yang berkembang pesat seiring meningkatnya permintaan konsumen terhadap sayuran segar, sehat, dan berkualitas. Namun, produktivitas dan mutu lettuce sangat dipengaruhi oleh manajemen air, terutama karena tanaman ini memiliki sistem perakaran relatif dangkal dan karakter fisiologis yang sensitif terhadap fluktuasi kadar air di zona perakaran. Dalam konteks perubahan iklim, peningkatan variabilitas curah hujan, serta keterbatasan sumber daya air irigasi, efisiensi penggunaan air menjadi isu strategis yang menentukan keberlanjutan produksi lettuce. Penelitian terkini menegaskan bahwa air merupakan faktor pembatas utama yang memengaruhi pertumbuhan vegetatif, pembentukan daun, serta kualitas hasil panen lettuce, dan kesalahan pengelolaan irigasi dapat berdampak langsung pada penurunan hasil maupun penurunan mutu komersial (Abdelbaset et al., 2023). Temuan tersebut menguatkan urgensi pengembangan sistem irigasi presisi yang mampu menjaga kondisi kelembapan tanah tetap optimal sekaligus hemat air, terutama pada komoditas sayuran daun yang memiliki siklus budidaya relatif singkat namun sensitif.

Selain kebutuhan air yang relatif tinggi, lettuce juga dikenal rentan terhadap *water stress*, baik dalam bentuk defisit air maupun kejenuhan berlebih. Defisit air dapat menyebabkan gangguan ekspansi sel daun, penurunan laju fotosintesis, dan penurunan bobot segar yang menjadi indikator utama kualitas pasar, sementara kejenuhan berlebih dapat memicu penurunan aerasi tanah dan hipoksia pada akar (Baram et al., 2022; Helmy et al., 2025; Zhang et al., 2026). Kebutuhan air berbasis evapotranspirasi dapat berada pada kisaran sekitar 21–27 mm per minggu pada romaine lettuce, sedangkan ETc

musiman pada lettuce komersial dapat mencapai sekitar 278 mm tergantung durasi pertumbuhan dan kondisi iklim (Cahn et al., 2022; French et al., 2024). Oleh karena itu, tantangan utama dalam produksi lettuce modern bukan hanya memenuhi kebutuhan air, melainkan memastikan bahwa suplai air diberikan pada waktu dan jumlah yang tepat agar tanaman tetap berada pada kondisi optimum tanpa menimbulkan risiko fisiologis.

Permasalahan penelitian utama pada manajemen irigasi lettuce terletak pada bagaimana menjaga keseimbangan antara ketersediaan air dan aerasi tanah di zona perakaran. Pada praktik konvensional, strategi irigasi sering bersifat statis, yaitu menerapkan kedalaman sumber air atau jadwal irigasi yang relatif sama sepanjang musim tanam. Pendekatan ini berpotensi tidak efisien karena kebutuhan air tanaman berubah secara signifikan antar fase pertumbuhan, sementara kondisi tanah dan dinamika evapotranspirasi juga berfluktuasi. Dalam sistem irigasi bawah permukaan, persoalan ini menjadi semakin kompleks karena suplai air yang terlalu besar atau *water table* yang terlalu dangkal dapat menyebabkan zona akar berada dalam kondisi jenuh lebih lama, meningkatkan risiko *waterlogging* dan *hipoksia*. Di sisi lain, *water table* yang terlalu dalam dapat membatasi suplai air melalui kapilaritas, menyebabkan defisit air terutama pada fase vegetatif cepat. Dengan demikian, masalah inti penelitian dapat dirumuskan sebagai kebutuhan untuk merancang strategi kontrol *water table depth* yang adaptif terhadap dinamika kebutuhan tanaman, sekaligus kompatibel dengan sistem irigasi bawah permukaan yang bertujuan meningkatkan efisiensi air.

Penelitian terbaru juga menegaskan bahwa irigasi bawah permukaan dapat menurunkan kehilangan air dan meningkatkan stabilitas kelembapan tanah,

sehingga mendukung pertumbuhan tanaman secara lebih konsisten (Sitterson et al., 2023; C. Wang et al., 2020) Pada konteks teknologi irigasi hemat air, *subsurface irrigation* juga dinilai mampu menekan kebutuhan total air tanpa mengorbankan hasil, sehingga menjadi alternatif penting untuk pertanian di wilayah dengan keterbatasan air (Li et al., 2024).

Meskipun demikian, penerapan *subsurface irrigation* tidak otomatis menjamin peningkatan hasil apabila tidak disertai pengelolaan kedalaman muka air tanah (*water table depth*) yang tepat. Pengelolaan *water table depth* merupakan aspek kritis karena berhubungan langsung dengan ketersediaan air bagi tanaman melalui mekanisme kapilaritas sekaligus menentukan status aerasi di zona akar. Dalam praktik budidaya, penempatan pipa irigasi sekitar 30 cm dari permukaan tanah sering dianggap sebagai kompromi yang baik untuk menjaga suplai air memadai sekaligus mengurangi risiko kejenuhan berlebih (Costa & Gianquinto, 2002). Namun, kedalaman *water table* yang terlalu dangkal dapat menyebabkan akumulasi air di zona perakaran, memicu hipoksia, dan menurunkan kesehatan akar. Risiko tersebut meningkat pada kondisi lingkungan tertentu, misalnya setelah hujan intensif atau pada media bertekstur halus dengan konduktivitas hidraulik rendah. Oleh sebab itu, solusi umum berupa adopsi *subsurface irrigation* perlu dilengkapi dengan strategi kontrol *water table* yang lebih presisi agar sistem mampu mempertahankan kelembapan optimum tanpa menciptakan kondisi anaerob.

Solusi spesifik yang mulai berkembang dalam literatur adalah penerapan strategi irigasi berbasis fase pertumbuhan (*stage-based irrigation*), yaitu penyesuaian jumlah dan pola suplai air berdasarkan kebutuhan spesifik tanaman pada tiap tahap perkembangan. Pendekatan ini dianggap lebih rasional

karena kebutuhan air dan sensitivitas tanaman terhadap stres air tidak konstan sepanjang siklus budidaya. Selain itu, strategi irigasi yang disesuaikan dengan kebutuhan fase pertumbuhan juga dilaporkan mampu mengurangi stres air yang berdampak negatif pada produktivitas (Zhang et al., 2021). Dengan kata lain, *stage-based irrigation* memberikan kerangka operasional yang memungkinkan manajemen air lebih adaptif terhadap dinamika fisiologi tanaman, terutama pada komoditas sayuran daun yang memiliki fase kritis pembentukan kanopi dan biomassa.

Namun demikian, integrasi *subsurface irrigation* dengan kontrol *water table depth* masih menyisakan gap penelitian yang signifikan, khususnya untuk tanaman sayuran daun seperti lettuce. Salah satu keterbatasan utama adalah pemahaman yang belum komprehensif mengenai interaksi antara kedalaman *water table*, distribusi kelembapan tanah, dan respon tanaman terhadap perubahan kondisi air–oksigen di zona perakaran. Literatur juga menunjukkan bahwa variasi kedalaman *water table* dapat memengaruhi efektivitas *subsurface irrigation* dalam mengoptimalkan penggunaan air dan meminimalkan risiko *waterlogging*, tetapi sebagian besar studi masih memisahkan pembahasan antara aspek kontrol *water table* dan aspek penjadwalan irigasi (Silva et al., 2022; M. Yang et al., 2020). Dengan demikian, diperlukan pendekatan penelitian yang tidak hanya mengevaluasi efek tunggal, tetapi juga menguji kombinasi strategi manajemen air yang terintegrasi.

Optimasi kedalaman *water table* berbasis fase pertumbuhan (*stage-based water table depth optimization*) dalam sistem *subsurface evapotranspiration irrigation* memiliki potensi besar untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi air pada budidaya lettuce. Penelitian ini

memfokuskan diri pada upaya merumuskan rekomendasi kedalaman *water table* yang optimum pada setiap fase pertumbuhan lettuce, dengan mempertimbangkan dinamika kebutuhan air yang direpresentasikan oleh ET dan risiko fisiologis akibat kejenuhan berlebih. Tujuan utama penelitian adalah menentukan kombinasi kedalaman *water table* yang paling efektif untuk memaksimalkan pertumbuhan, hasil, dan efisiensi penggunaan air (WUE), sekaligus menjaga kondisi aerasi zona akar tetap aman. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan prinsip *stage-based irrigation* dalam kerangka kontrol *water table depth* untuk komoditas lettuce, yang selama ini relatif terbatas dalam literatur. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada evaluasi respon lettuce terhadap variasi kedalaman *water table* pada sistem irigasi bawah permukaan berbasis ET, dengan indikator utama meliputi dinamika kelembapan tanah, parameter pertumbuhan vegetatif, hasil panen, serta efisiensi penggunaan air.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini dilaksanakan dari November 2024 hingga Desember 2024, di Rumah Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya, Jalan Anyep, Bukit Lama, Kecamatan Ilir Barat 1, Kota Palembang.

Penelitian ini menggunakan alat: 1) Atmos 14 2) Automatic Weather Station (AWS) dengan Sensor Setup Steps; 3) Ayakan 10 mesh ; 4) Bak kontrol 70 Liter; 5) Cangkul; 6) Double Drat; 7) Gergaji Besi; 8) Gelas Ukur (1000ml); 9) JXCT Multi In One Soil EC PH NPK Temperature and Moisture Sensor Soil; 10) Kamera 50MP; 11) Kayu Gelam diameter 5 cm; 12) Kotak Akrilik (15cmx15 cm x 20 cm); 13) Kursi Penyangga Reservoir (h = 50 cm) ; 14) Laptop, 15) Logger EM50; 16) Mesin Bor Listrik, 17) Mesin Gerinda; 19)

Meteran Pita; 20) Tray semai no 10; 21) Panci Evaporasi, 22) Ring Sample, 23) Stop Kran Tipe Pelampung 24) Neraca Analitik; 25) Timbangan Analog. Bahan penelitian terdiri dari 1) Pipa PVC ½ in; 2) Plastik UV (Ultraviolet) 14% ; 3) Polibag 25x30; 4) Sambungan Pipa Elbow ½ in; 5) 6) Sekrup; 7) Sock Drat Luar Dalam; 8) Stop Kran; 9); 10) Terpal kolam ukuran 100 cm x100 cm x 50 cm 11); 11) Benih Selada; 12) Pasir; 13) Pupuk Kandang Sapi; 14) Tanah ultisol; 15) Rockwool.

Penelitian ini menguji dan mengoptimalkan kedalaman muka air tanah (*water table depth*) berbasis fase pertumbuhan pada budidaya lettuce (*Lactuca sativa*) di bawah sistem irigasi bawah permukaan berbasis evapotranspirasi (*subsurface evapotranspiration irrigation system*). Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode deskriptif dengan 2 faktor perlakuan yaitu di dalam greenhouse dan di luar greenhouse yang memiliki 4 kelompok kombinasi perlakuan yang masing-masing perlakuan diulang sebanyak 4 kali pengulangan sehingga berjumlah 32 percobaan. Pendekatan penelitian menggabungkan eksperimen terkontrol, pemantauan kelembapan zona akar, penjadwalan irigasi berbasis ETc, serta analisis data untuk menentukan kombinasi *water table depth* optimum pada setiap fase pertumbuhan.

Setiap perlakuan ada 4 kali pengulangan. Taraf setiap perlakuan adalah sebagai berikut: (Perlakuan Media Tanam A1 = 100% (Tanah lolos ayakan 10 mesh + pupuk kandang 2:1) ; A2 = 75% (Tanah lolos ayakan 10 mesh + pupuk kandang 2:1) + Pasir (25%); A3 = 65% (Tanah lolos ayakan 10 mesh + pupuk kandang 2:1) + Pasir (35%) ; A4 = 50% (Tanah lolos ayakan 10 mesh + pupuk kandang 2:1) + Pasir (50%). Penelitian ini menggunakan metode deskriptif berupa pengumpulan data dengan studi pustaka dan pengamatan langsung ke lapangan.

Hasil data disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

Penelitian dirancang menggunakan prinsip *stage-based schedule*, yaitu pembagian siklus pertumbuhan lettuce menjadi beberapa fase yang relevan untuk manajemen air. Pembagian fase diperlukan karena kebutuhan air dan sensitivitas tanaman terhadap stres air tidak konstan sepanjang musim tanam. Strategi irigasi berbasis fase pertumbuhan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mempertahankan performa tanaman dibanding strategi irigasi statis, karena suplai air dapat disesuaikan dengan sensitivitas dan kebutuhan tanaman pada setiap tahap pertumbuhan. Pada penelitian ini, fase pertumbuhan dapat ditetapkan sebagai fase awal (*establishment*), fase pertumbuhan vegetatif, dan fase akhir menjelang panen. Pada setiap fase tersebut, *water table depth* diperlakukan pada beberapa level kedalaman (misalnya dangkal, sedang, dan dalam) untuk mengevaluasi respons tanaman dan dinamika kelembapan tanah secara lebih detail.

Sumber menyarankan penggunaan tiga hingga lima replikasi untuk memperoleh data yang stabil dan dapat dianalisis secara statistik dengan lebih kuat (Amisshah et al., 2024). Selain replikasi, randomisasi penempatan perlakuan dilakukan untuk mengurangi bias akibat variasi iklim mikro atau heterogenitas media tanam, terutama apabila penelitian dilakukan pada pot atau *raised bed* di *greenhouse*. Randomisasi merupakan prinsip penting agar variasi kondisi lingkungan tidak terakumulasi pada satu perlakuan tertentu (Li et al., 2024).

Sistem irigasi bawah permukaan yang digunakan dalam penelitian ini (SIEVAPET) dirancang untuk memungkinkan kontrol kedalaman muka air tanah secara stabil dan terukur. Secara operasional, kontrol dilakukan melalui pengaturan tinggi kolom air pada reservoir

atau perangkat pengatur level yang terhubung ke media tanam, sehingga target *water table depth* dapat dipertahankan sesuai perlakuan. Stabilitas kontrol menjadi aspek krusial karena fluktuasi yang besar dapat mengaburkan perbedaan perlakuan antar fase. Oleh sebab itu, pemantauan kontinu terhadap level air perlu dilakukan dengan perangkat *water level control* atau sensor level, sehingga penyesuaian dapat dilakukan secara cepat bila terjadi deviasi dari target.

Untuk mengevaluasi mekanisme respon sistem dan tanaman, pengukuran *soil moisture profile* dilakukan secara terstruktur pada kedalaman zona akar. Sensor kelembapan tanah berbasis *Time Domain Reflectometry* (TDR) atau *dielectric soil moisture sensors* dapat digunakan untuk memperoleh pembacaan *real-time* kelembapan tanah. Sensor semacam ini mendukung pemantauan kontinu dan dapat diintegrasikan dengan sistem otomatisasi untuk pengendalian irigasi (Himanshu et al., 2023). Pendekatan berbasis ambang potensial air tanah telah dilaporkan efektif untuk mendukung pengelolaan irigasi tetes, pemantauan status air tanah, pengendalian salinitas, dan peningkatan produktivitas air tanaman (Xiao et al., 2023).

Penjadwalan irigasi dalam penelitian ini menggunakan pendekatan berbasis evapotranspirasi tanaman (E_{tc}) untuk memastikan suplai air konsisten dengan kebutuhan aktual tanaman pada setiap fase. E_{tc} dihitung dengan persamaan standar $E_{tc} = E_{to} \times K_c$, di mana E_{to} adalah evapotranspirasi referensi dan K_c adalah koefisien tanaman yang menggambarkan kebutuhan spesifik lettuce pada fase tertentu. Nilai K_c dapat diadopsi dari literatur yang relevan untuk lettuce dan kondisi lingkungan serupa, karena K_c dapat bervariasi antar lokasi dan sistem budidaya (Abdelbaset et al., 2023). Dengan demikian, E_{tc} menjadi basis

kuantitatif untuk mengatur volume air yang harus diganti selama periode tertentu.

Agar ETc dapat diterjemahkan menjadi keputusan operasional, penelitian menyusun aturan penjadwalan irigasi (*decision rules*) yang jelas dan terukur. Langkah pertama adalah mendefinisikan target kelembapan tanah atau target kondisi air tanah yang dianggap optimum pada setiap fase, berdasarkan kombinasi kebutuhan ETc dan toleransi tanaman terhadap kejenuhan. Langkah berikutnya adalah menetapkan protokol kapan irigasi atau suplai air dilakukan dan berapa volume yang diberikan, misalnya dengan mengganti kehilangan air harian ketika ETc melampaui ambang tertentu pada fase vegetatif cepat. Aturan ini dapat dikombinasikan dengan umpan balik sensor kelembapan tanah untuk menghindari *over-irrigation*. Implementasi semi otomatis menjadi penting untuk menjaga konsistensi perlakuan dan mengurangi kesalahan manusia, terutama ketika penelitian memerlukan kontrol yang presisi pada banyak unit percobaan. Literatur menunjukkan bahwa integrasi sistem otomatis berbasis sensor dapat membantu memastikan aplikasi air terjadi pada waktu optimum dan meningkatkan efisiensi penggunaan air (K. Sharma et al., 2024).

Variabel respon yang diamati dalam penelitian ini mencakup indikator tanah dan tanaman yang relevan untuk tujuan optimasi. Pada aspek tanah, parameter utama meliputi kelembapan volumetrik, serta kestabilan *water table depth* pada setiap perlakuan. Pada aspek tanaman, pengamatan dilakukan pada parameter pertumbuhan vegetatif (tinggi tanaman, jumlah daun, luas daun, dan biomassa) serta hasil panen (bobot segar dan bobot kering). Selain itu, efisiensi penggunaan air dihitung menggunakan indikator WUE atau produktivitas air, yaitu rasio hasil produksi tanaman terhadap total

air yang digunakan selama siklus budidaya.

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan *water table depth* berbasis fase terhadap respons tanaman dan dinamika air tanah. Secara statistik, data dianalisis menggunakan ANOVA atau model linear umum untuk menguji perbedaan antar perlakuan dan antar fase, disertai uji lanjut untuk mengidentifikasi perlakuan yang berbeda nyata. Selain analisis perbandingan, penelitian diarahkan untuk menghasilkan rekomendasi optimum, sehingga pendekatan optimasi dapat digunakan untuk menentukan kombinasi *water table depth* yang memaksimalkan hasil dan WUE secara simultan. Optimasi untuk membedakan antara pendekatan *single-objective* dan *multi-objective*, di mana *multi-objective* lebih relevan ketika terdapat trade-off antara hasil, efisiensi air, dan risiko kejenuhan berlebih (Li et al., 2024; Sitterson et al., 2023).

Secara keseluruhan, metodologi penelitian ini menggabungkan desain eksperimen yang ketat (pembagian fase, replikasi, randomisasi, dan kontrol), sistem kontrol *water table depth* yang stabil, pemantauan kelembapan zona akar berbasis sensor dan tensiometer, serta penjadwalan suplai air berbasis ETc yang diterjemahkan menjadi aturan keputusan yang terukur. Kombinasi ini menghasilkan data untuk menentukan kedalaman muka air tanah optimum pada setiap fase pertumbuhan lettuce pada *subsurface evapotranspiration irrigation system*.

Analisis data dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan *water table depth* berbasis fase terhadap respons tanaman dan dinamika air tanah. Selain analisis perbandingan, penelitian diarahkan untuk menghasilkan rekomendasi optimum, sehingga pendekatan optimasi dapat digunakan

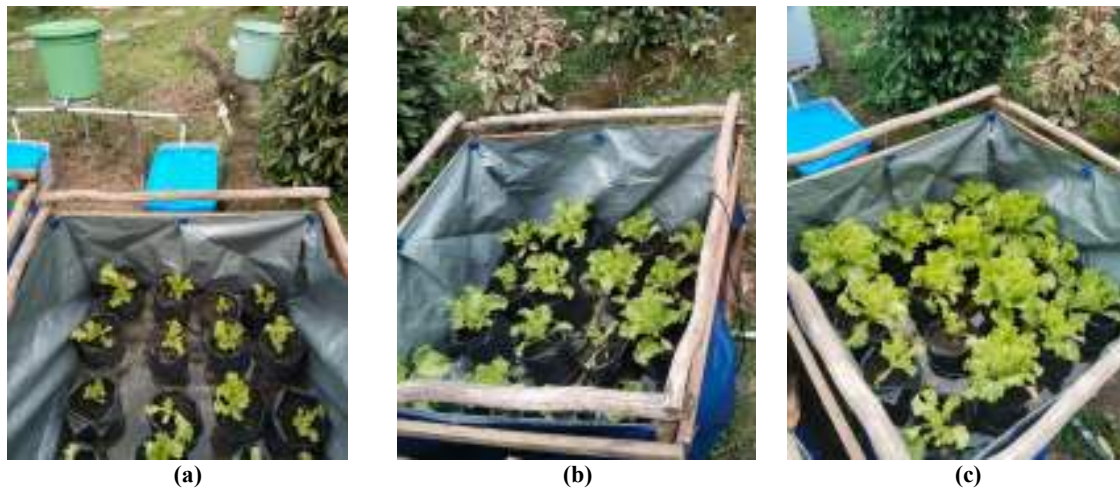
untuk menentukan kombinasi *water table depth* yang memaksimalkan hasil produksi. Optimasi untuk membedakan antara pendekatan *single-objective* dan *multi-objective*, di mana *multi-objective* lebih relevan ketika terdapat *trade-off* antara hasil, dan risiko kejenuhan berlebih (Li et al., 2024; Sitterson et al., 2023).

Secara keseluruhan, metodologi penelitian ini menggabungkan desain eksperimen yang ketat (pembagian fase, replikasi, randomisasi, dan kontrol), sistem kontrol *water table depth* yang stabil, pemantauan kelembapan zona akar berbasis sensor dan tensiometer, serta penjadwalan suplai air berbasis ETc yang diterjemahkan menjadi aturan keputusan yang terukur. Kombinasi ini menghasilkan

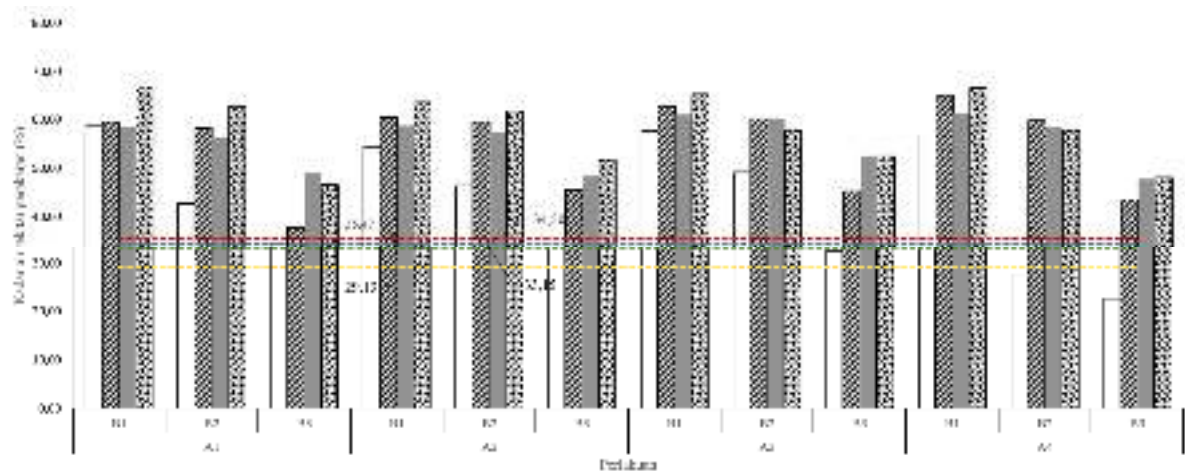
data untuk menentukan kedalaman muka air tanah optimum pada setiap fase pertumbuhan lettuce pada *subsurface evapotranspiration irrigation system*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini disajikan untuk menjelaskan kinerja sistem kontrol *water table depth* pada sub irigasi petakan sistem SIEVAPET (Sistem Evapotranspirasi Petakan), dinamika distribusi kadar air pada berbagai media tanah–pasir, serta respons pertumbuhan dan produktivitas lettuce. Pembahasan disusun secara induktif dengan menautkan temuan empiris pada mekanisme fisika tanah dan fisiologi tanaman, sekaligus menguji konsistensinya dengan temuan penelitian terdahulu.



Gambar 1. Pengujian sistem SIEVAPET pada tanaman Selada (a) Fase awal, (b) Fase tengah, (c) Fase akhir



Gambar 2. Grafik Kadar Air Pada Perlakuan Tinggi Muka Air

Pada Gambar 1, menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan kedalaman muka air untuk memberikan kadar air zona perakaran mendekati target kadar air media tanam di sekitar perakaran tanaman meskipun terjadi variasi harian ET dan perubahan kondisi lingkungan.

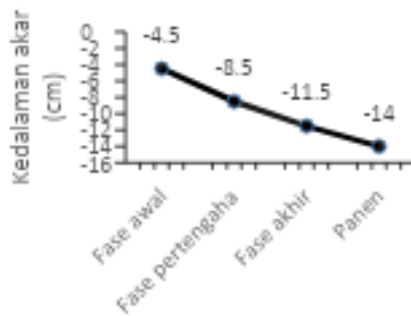
Tabel 1. Kadar air kapasitas Lapang masing-masing media tanam campuran yang diuji pada tanaman Selada hijau

Campuran Media	Kadar air kapasitas Lapang (%) (v/v)	Densitas (ρ) (gr/cm^3)	Porositas (η)	Angka pori (e)
A1	35,47	0,53	0,6217	1,6431
A2	34,50	0,74	0,7032	2,3691
A3	33,15	0,64	0,6115	1,5738
A4	29,13	0,89	0,6013	1,5080

Hasil pengamatan kedalaman akar tanaman selada dapat dilihat pada Gambar 3.

Kadar air kapasitas Lapang dari masing-masing media tanam yang diuji

pada penelitian ini terdapat pada Tabel 2. Semakin banyak diberikan campuran menunjukkan bahwa campuran media yang berbeda memberikan respon kapasitas menahan air yang berbeda. Dari pengujian karakteristik fisik media tanam berupa sifat bulk density media tanam menunjukkan nilai yang berbeda. Sesuai dengan teori konseptual, stabilitas ini merupakan prasyarat agar strategi stage-based dapat berjalan efektif, karena fluktuasi muka air yang besar dapat mengubah status air zona akar secara tidak terkontrol. Parameter performa kontrol yang relevan meliputi error target water level, amplitudo fluktuasi harian, serta response time terhadap perubahan beban ET (A. L. B. R. da Silva et al., 2018). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian dimana sistem kontrol yang baik dapat menyesuaikan kedalaman air tanah secara cepat untuk menjaga ketersediaan air tanaman meskipun kondisi lingkungan berubah (González-Teruel et al., 2019). Namun, pada kondisi ekstrem seperti evaporasi sangat tinggi atau kejadian hujan/penambahan air yang tidak terprediksi, risiko deviasi sementara tetap dapat muncul, sehingga kebutuhan monitoring *real-time* menjadi penting.



Gambar 3. Hasil pengamatan pertumbuhan akar tanaman selada yang ditanam pada SIEVAPET

Tabel 2. Hasil pengukuran kadar air di sekitar perakaran di beberapa letak zona pada kondisi campuran yang berbeda pada pertumbuhan tanaman selada (pola distribusi air) pada tiap fase pertumbuhan tanaman Selada.

Campuran Media dan Letak Zona Fase Awal	Campuran Media dan Letak Zona Tengah -Akhir	Kadar Air (%) (v/v) Fase Tengah	Kadar Air (%) (v/v) Fase Akhir
A1B2	A1B1	59,53	58,56
A1B3	A1B2	58,29	56,11
A1B4	A1B3	37,86	49,06
A2B2	A2B1	60,50	58,84
A2B3	A2B2	59,51	57,58
A2B4	A2B3	45,59	48,42
A3B2	A3B1	62,78	61,14
A3B3	A3B2	60,33	60,36
A3B4	A3B3	45,28	52,58
A4B2	A4B1	65,05	61,48
A4B3	A4B2	59,90	58,59
A4B4	A4B3	43,66	47,88

Perubahan *water table depth* berhubungan erat dengan dinamika kelembapan zona akar secara temporal.

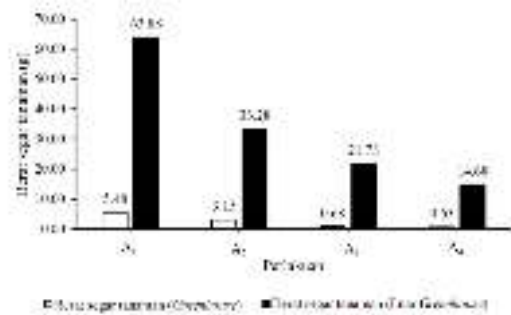
Ketika muka air naik, kelembapan volumetrik di zona akar meningkat; sebaliknya, penurunan muka air menurunkan kelembapan dan berpotensi memicu stres air. Hubungan ini tidak selalu instan, karena terdapat *lag time* yang dipengaruhi oleh bukan hanya oleh tekstur dan struktur media serta karakter aliran air tak jenuh (S. Wang et al., 2018; M. Yang et al., 2020), tetapi juga pengaruh sifat fisik media berupa porositas media. Secara praktis, hasil ini menegaskan bahwa pengaturan *water table* bukan hanya pengaturan “tinggi air”, melainkan instrumen untuk mengendalikan *soil moisture thresholds* yang menentukan laju pertumbuhan dan pembentukan daun.

Pola distribusi kadar air vertikal pada *subsurface irrigation* SIEVAPET memperlihatkan perbedaan yang nyata antar media campuran tanah–pasir. Pada media dengan fraksi pasir lebih tinggi, distribusi kelembapan cenderung lebih terfokus di sekitar sumber air dan lebih cepat bergerak ke bawah, sehingga risiko perkolasi dalam meningkat. Sebaliknya, pada media bertekstur lebih halus, distribusi cenderung lebih merata dan mempertahankan kelembapan lebih lama di zona akar (M. Yang et al., 2020). Perbedaan ini konsisten dengan teori bahwa tanah berpasir memiliki pori besar yang mempercepat aliran, sedangkan tanah halus memiliki kapasitas simpan air lebih tinggi tetapi berisiko kejenuhan bila suplai berlebih (González-Teruel et al., 2019). Uniformitas distribusi dapat dievaluasi menggunakan *coefficient of variation* (CV), *wetted volume*, dan kedalaman *wetting front* (M. Wei et al., 2025).

Respons pertumbuhan Selada menunjukkan bahwa indikator seperti jumlah daun, LAI, biomassa, dan tinggi tanaman meningkat ketika kelembapan zona akar berada pada rentang optimum, tetapi menurun pada kondisi defisit

maupun kejenuhan berlebih. Literatur menegaskan bahwa Selada sensitif terhadap defisit air terutama pada fase awal dan pembentukan daun ((H. Sharma et al., 2017), sementara waterlogging dapat menurunkan LAI dan biomassa melalui kerusakan akar dan gangguan fotosintesis (Abdelbaset et al., 2023; Deng et al., 2018). Dalam penelitian ini, biomassa dan jumlah daun muncul sebagai indikator yang paling konsisten untuk membedakan perlakuan, sejalan dengan laporan bahwa kedua parameter tersebut sensitif terhadap variasi kelembapan dan berkorelasi langsung dengan produktivitas (He et al., 2021). Dengan demikian, pengaturan water table depth berbasis fase dapat dipahami sebagai strategi untuk menjaga tanaman berada pada threshold kelembapan yang produktif sepanjang siklus budidaya.

Kelima, perlakuan *water table depth* dan subirigasi memengaruhi hasil segar (*fresh weight yield*), uniformitas tanaman, serta beberapa parameter kualitas. Kedalaman water table yang optimum meningkatkan akses air dan nutrisi sehingga meningkatkan yield segar, sedangkan kedalaman yang terlalu dangkal meningkatkan risiko waterlogging dan menurunkan hasil melalui hipoksia akar (T. Yang et al., 2024). Parameter kualitas yang responsif terhadap pengelolaan air meliputi kadar klorofil/SPAD (Silva et al., 2018). Waterlogging ringan dapat memberikan efek yang kompleks terhadap kualitas daun, termasuk perubahan warna dan tekstur akibat penurunan efisiensi fotosintesis (C. Wei et al., 2021; M. Wei et al., 2025).



Gambar 4. Hasil panen selada yang dibudidayakan dengan SIEVAPET

Produksi selada dengan SIEVAPET menunjukkan bahwa campuran media tanam menunjukkan media tanam tanah ultisol dan pupuk kandang (A1) tanpa sekam menunjukkan hasil yang paling baik dibandingkan campuran media yang lainnya. Secara keseluruhan, temuan mendukung bahwa kontrol *water table depth* berbasis fase dalam subsurface ET irrigation merupakan strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan *yield*, uniformitas, dengan catatan bahwa desain sistem, tekstur media, serta monitoring sensor harus dikelola secara presisi untuk meminimalkan risiko kegagalan kontrol (Amissah et al., 2024).

Penelitian ini menegaskan bahwa optimasi kedalaman muka air tanah (*water table depth*) berbasis fase pertumbuhan merupakan pendekatan yang relevan dan efektif untuk meningkatkan kinerja sistem SIEVAPET pada budidaya selada (*lettuce*). Sistem SIEVAPET mempunyai potensi untuk mendekati kadar air kapasitas Lapang untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman selada dengan strategi *stage-based* memungkinkan pengelolaan air yang lebih adaptif karena kebutuhan air tanaman dan sensitivitas terhadap stres air tidak bersifat konstan sepanjang siklus budidaya. Dengan demikian, pengaturan muka air tanah yang dinamis dinilai lebih rasional dibanding pengaturan statis, terutama pada tanaman sayuran daun yang memiliki sistem perakaran relatif

dangkal dan respons cepat terhadap perubahan kondisi air.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas kontrol *water table depth* merupakan prasyarat utama keberhasilan sistem subirigasi SIEVAPET khususnya di bawah variasi harian ET dan perubahan kondisi lingkungan. Sistem SIEVAPET stabilitas kontrol yang baik mampu menjaga ketersediaan air di zona akar mendekati kondisi optimum, sekaligus mengurangi risiko fluktuasi kelembapan yang dapat memicu defisit air maupun kejenuhan berlebih. SIEVAPET juga menunjukkan bahwa perubahan muka air tanah terbukti berkaitan erat dengan dinamika kelembapan zona akar secara temporal, dengan respons yang dipengaruhi oleh karakter media tanam dan mekanisme aliran air tak jenuh.

Penelitian ini juga memperlihatkan bahwa tekstur media tanah-pasir memengaruhi pola distribusi kadar air vertikal-horizantal, uniformitas kelembapan, serta risiko perkolasi dalam. Variasi karakter media tersebut menjadi faktor penentu dalam desain dan pengelolaan sistem irigasi bawah permukaan (SIEVAPET khususnya), karena memengaruhi sebaran air, volume basah efektif, serta kemampuan tanaman mengakses air secara merata. Pada tingkat tanaman, indikator pertumbuhan seperti biomassa dan jumlah daun menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap variasi kelembapan zona akar, sehingga dapat digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi keberhasilan pengaturan muka air tanah.

Dari perspektif produktivitas dan keberlanjutan, integrasi *subsurface irrigation* dengan kontrol *water table*

depth berbasis fase dan penjadwalan berbasis ET berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan air **sekaligus** mempertahankan hasil dan uniformitas lettuce. Namun, penelitian ini juga menegaskan adanya *trade-off* antara peningkatan efisiensi air dan risiko penurunan yield maupun kualitas apabila kelembapan terlalu rendah atau terlalu tinggi. Oleh karena itu, rekomendasi optimum perlu mempertimbangkan keseimbangan antara hasil, efisiensi air, serta risiko *waterlogging/hipoksia*, sehingga dapat diterapkan secara lebih aman dan efektif pada kondisi budidaya yang beragam.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelbaset, M. M., Dewedar, O. M., Youssef, E. A., Molina-Martínez, J. M., & El-Shafie, A. (2023). Reducing Deep Percolation Losses Using a Geotextile Layer at Different Soil Depths and Irrigation Levels for Lettuce Crop (*Lactuca Sativa* L. Var. *Capitata*) (Limor). *Agronomy*, 13(6), 1652. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061652>
- Amissah, S., Ankomah, G., Lee, R. D., Perry, C. D., Washington, B. J., Porter, W., Virk, S., Bryant, C., Vellidis, G., Harris, G. H., Cabrera, M. L., Franklin, D. H., Díaz-Pérez, J. C., & Sintim, H. Y. (2024). Assessing Corn Recovery From Early Season Nutrient Stress Under Different Soil Moisture Regimes. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344022>
- Baram, S., Weinstein, M., Evans, J. F., Berezkin, A., Sade, Y., Ben-Hur, M., Bernstein, N., & Mamane, H. (2022).

- Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration. *Scientia Horticulturae*, 291, 110550.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110550>
- Cahn, M. D., Johnson, L. F., & Benzen, S. D. (2022). Evapotranspiration Based Irrigation Trials Examine Water Requirement, Nitrogen Use, and Yield of Romaine Lettuce in the Salinas Valley. *Horticulturae*, 8(10).
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8100857>
- Costa, L. D., & Gianquinto, G. (2002). Water Stress and Watertable Depth Influence Yield, Water Use Efficiency, and Nitrogen Recovery in Bell Pepper: Lysimeter Studies. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(2), 201–210.
<https://doi.org/10.1071/ar00133>
- Deng, J., Guo, L., Salas, W., Ingraham, P., Charrier-Klobas, J. G., Frolking, S., & Li, C. (2018). Changes in Irrigation Practices Likely Mitigate Nitrous Oxide Emissions From California Cropland. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(10), 1514–1527.
<https://doi.org/10.1029/2018gb005961>
- Elshikha, D. E. M., Waller, P., Hunsaker, D. J., Thorp, K. R., Wang, G., Dierig, D. A., Cruz, V. M. V., Attalah, S., Katterman, M. E., Williams, C. F., Ray, D. T., Norton, R., Orr, E., Wall, G. W., & Ogden, K. L. (2023). Water Use, Growth, and Yield of Ratooned Guayule Under Subsurface Drip and Furrow Irrigation in the US Southwest Desert. *Water*, 15(19), 3412.
<https://doi.org/10.3390/w15193412>
- French, A. N., Sanchez, C. A., Hunsaker, D. J., Anderson, R. G., Saber, M. N., & Wisniewski, E. H. (2024). Lettuce evapotranspiration and crop coefficients using eddy covariance and remote sensing observations. *Irrigation Science*, 42(6), 1245–1272.
<https://doi.org/10.1007/s00271-024-00921-x>
- González-Teruel, J. D., Torres-Sánchez, R., Blaya-Ros, P. J., Toledo, A., Buendía, M. J., & Soto, F. (2019). Design and Calibration of a Low-Cost SDI-12 Soil Moisture Sensor. *Sensors*, 19(3), 491.
<https://doi.org/10.3390/s19030491>
- He, J., Dougherty, M., & Chen, Z. (2021). Numerical Assessment of a Soil Moisture Controlled Wastewater SDI Disposal System in Alabama Black Belt Prairie. *Chemosphere*, 263, 128210.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128210>
- Helmy, H. S., Abuarab, M. E., Abdeldaym, E. A., Abdelaziz, S. M., Abdelbaset, M. M., Dewedar, O. M., Molina-Martinez, J. M., El-Shafie, A. F., & Mokhtar, A. (2025). Field-grown lettuce production optimized through precision irrigation water management using soil moisture-based capacitance sensors and biodegradable soil mulching. *Irrigation Science*, 43(5), 1045–1070.
<https://doi.org/10.1007/s00271-024-00969-9>
- Himanshu, S. K., Ale, S., Bell, J., Fan, Y., Samanta, S., Bordovsky, J. P., Gitz III, D. C., Lascano, R. J., & Brauer, D. K. (2023). Evaluation of growth-stage-based variable deficit irrigation strategies

- for cotton production in the Texas High Plains. *Agricultural Water Management*, 280, 108222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108222>
- Li, N., Li, J., Shi, X., Shi, F., Tian, Y., Wang, J., Hao, X., Luo, H., & Wang, Z. (2024). Increasing Cotton Lint Yield and Water Use Efficiency for Subsurface Drip Irrigation Without Mulching. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1433719>
- Sharma, H., Shukla, M. K., Bosland, P. W., & Steiner, R. L. (2017). Soil Moisture Sensor Calibration, Actual Evapotranspiration, and Crop Coefficients for Drip Irrigated Greenhouse Chile Peppers. *Agricultural Water Management*, 179, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>
- Sharma, K., Sharma, J. C., Sharma, S., Sharma, N., Sharma, R., Ananthakrishnan, S., Hashem, A., Almutairi, K. F., & Allah, E. F. A. (2024). Optimizing Leaf Nutrient Status, Growth, and Yield Parameters in High-Density Apple Orchards (Cv. Super Chief) via Integrated Drip Irrigation and Fertigation Techniques. *Heliyon*, 10(16), e36136. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36136>
- Silva, C. J. d., Silva, C. A. d., Rodrigues, R. E., Pontes, N. d. C., Silva, L. F. M. da, & Megguer, C. A. (2022). Physicochemical Characteristics of Tomato Fruits for Industrial Processing According to the Irrigation Management. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental*, 26(7), 513–519. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n7p513-519>
- Silva, A. L. B. R. da, Hashiguti, H. T., Zotarelli, L., Migliaccio, K. W., & Dukes, M. D. (2018). Soil Water Dynamics of Shallow Water Table Soils Cultivated With Potato Crop. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1–15. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0077>
- Sitterson, J. M., Andales, A. A., Mooney, D. F., Capurro, M. C., & Brummer, J. E. (2023). Developing a Crop Water Production Function for Alfalfa Under Deficit Irrigation: A Case Study in Eastern Colorado. *Agriculture*, 13(4), 831. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040831>
- Wang, C., Dan, B., Li, Y., Wang, X., Pei, Z., & Dong, Z. (2020). Infiltration Characteristics and Spatiotemporal Distribution of Soil Moisture in Layered Soil Under Vertical Tube Irrigation. *Water*, 12(10), 2725. <https://doi.org/10.3390/w12102725>
- Wang, S., Jiao, X., Guo, W., Lü, J., Bai, Y., & Wang, L. (2018). Adaptability of Shallow Subsurface Drip Irrigation of Alfalfa in an Arid Desert Area of Northern Xinjiang. *Plos One*, 13(4), e0195965. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195965>
- Wei, C., Zhu, Y., Zhang, J., & Wang, Z. (2021). Evaluation of Suitable Mixture of Water and Air for Processing Tomato in Drip Irrigation in Xinjiang Oasis.

- Sustainability*, 13(14), 7845.
<https://doi.org/10.3390/su13147845>
- Wei, M., Shi, Y., Yang, Q., & Liang, J. (2025). Oxygenated Subsurface Drip Irrigation and Organic Fertilizer Increase the Yield and Quality of *P. Notoginseng* by Improving Soil Microenvironment. *Soil Use and Management*, 41(1).
<https://doi.org/10.1111/sum.13156>
- Xiao, C., Ji, Q., Zhang, F., Li, Y., Fan, J., Hou, X., Yan, F., Liu, X., & Gong, K. (2023). Effects of various soil water potential thresholds for drip irrigation on soil salinity, seed cotton yield and water productivity of cotton in northwest China. *Agricultural Water Management*, 279(November 2022).
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108172>
- Yang, M., Leghari, S. J., Guan, X., Ma, S., Ding, C.-M., Mei, F.-J., Wei, L., & Wang, T. (2020). Deficit Subsurface Drip Irrigation Improves Water Use Efficiency and Stabilizes Yield by Enhancing Subsoil Water Extraction in Winter Wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00508>
- Yang, T., Samarakoon, U., & Altland, J. (2024). Growth, phytochemical concentration, nutrient uptake, and water consumption of butterhead lettuce in response to hydroponic system design and growing season. *Scientia Horticulturae*, 332, 113201.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113201>
- Zhang, H., Ma, L., Douglas-Mankin, K. R., Han, M., & Trout, T. J. (2021). Modeling maize production under growth stage-based deficit irrigation management with RZWQM2. *Agricultural Water Management*, 248(January), 106767.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106767>
- Zhang, Z., Mao, Y., Huang, S., Li, Y., Wu, M., Niu, W., Yang, R., & Zhang, Z. (2026). Root-zone oxygen supply improves lettuce photosynthetic function under waterlogging stress and promotes plant growth. *Plant Physiology and Biochemistry*, 232, 111119.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2026.111119>