PERTANIAN PRESS

PEMBELAJARAN TEKNIK *GREENHOUSE*

Erniati, dkk.

PEMBELAJARAN TEKNIK *GREENHOUSE*

Erniati, dkk.

PERTANIAN PRESS
2025

Pembelajaran Teknik *Greenhouse*
©Penulis

Penulis	:	Erniati | Soesilo Wibowo | Annisa Nur Ichniarsyah | Folkes E. Laumal
Penelaah substansi	:	Prof. Dr. Ir. Herry Suhardiyanto, M.Sc., IPU
Editor	:	Epik Finilih | Ricka Resita Isniar
Editor pruf	:	Slamet Sutriswanto
Desain kover dan penata isi	:	Rifki Oktiar Rachman | Dimas Rifqi Altranu | Hidayat Raharja

Katalog Dalam Terbitan (KDT):

Judul dan penanggung jawab	:	Pembelajaran Teknik *Greenhouse* / Erniati, Soesilo Wibowo, Annisa Nur Ichniarsyah, Folkes E. Laumal ; editor, Ricka Resita Isniar, Epik Finilih
Publikasi	:	Bogor: Pertanian Press, 2025
Deskripsi fisik	:	ii, 94 halaman : ilustrasi berwarna ; 21 cm
Identifikasi	:	E-ISBN 978-979-582-447-3 (PDF)
Subjek	:	Rumah kaca
Klasifikasi	:	635.90286 [23]
Perpusnas ID	:	https://isbn.perpusnas.go.id/bo-penerbit/penerbit/isbn/data/view-kdt/1296058
Sumber gambar kover	:	Atami.com | Sumberplastik.co.id | istock

Penerbit:
Pertanian Press, Anggota Ikapi
Badan Penyuluhan dan Pengembangan Sumber Daya Manusia Pertanian
Jl. Harsono RM No.3, Ragunan, Jakarta Selatan

Alamat Redaksi:
Balai Besar Perpustakaan dan Literasi Pertanian
Jl. Ir. H. Juanda No.20 Bogor 16122
Website: https://epublikasi.pertanian.go.id/pertanianpress

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Pertanian Press
Tersedia untuk diunduh secara gratis:
epublikasi.pertanian.go.id/pertanianpress

Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).
Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

PRAKATA

Puji syukur tak terhingga kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga buku Pembelajaran Teknik *Greenhouse* ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik. Tujuan utama penyusunan buku ini adalah memberikan panduan yang utuh, praktis, dan terkini bagi para pembaca—khususnya mahasiswa, akademisi, dan praktisi di bidang pertanian—agar mampu menguasai konsep, teknik, dan teknologi mutakhir yang terkait dengan perancangan, operasional, dan pemanfaatan sistem *greenhouse* dalam budi daya tanaman.

Greenhouse merupakan salah satu teknologi pertanian modern yang memiliki peran sangat penting dalam upaya meningkatkan produktivitas, kualitas hasil pertanian, dan menjaga kontinuitas suplai pangan. Berbagai aspek terkait dengan penggunaan *greenhouse*, mulai dari konsep dasar, sistem kontrol lingkungan, hingga teknik budi daya tanaman yang efektif diuraikan secara sistematis dan lengkap dalam buku ini. Kami berharap buku ini tidak hanya menjadi sumber referensi teoretis, tetapi juga sebagai pedoman praktis yang mampu menginspirasi inovasi dan mendukung keberhasilan implementasi *greenhouse* di lapangan.

Akhir kata, semoga kehadiran buku Pembelajaran Teknik *Greenhouse* ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di sektor pertanian, serta secara nyata mendukung peningkatan

kualitas dan kuantitas produksi pertanian melalui pemanfaatan *greenhouse* di berbagai wilayah Indonesia. Selamat membaca!

Bogor, Desember 2025

Tim Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **viii**
DAFTAR GAMBAR .....
BAB 1 KONSEP *GREENHOUSE* **1**
A. Konsep *Greenhouse* 1
B. Budi Daya Tanaman di dalam *Greenhouse* 11
BAB 2 RANCANGAN *GREENHOUSE* **21**
A. Struktur dan Konstruksi *Greenhouse* 21
B. Rancangan Fungsional *Greenhouse* 23
C. Rancangan Struktural *Greenhouse* 28
BAB 3 PENGENDALIAN LINGKUNGAN DI DALAM *GREENHOUSE* **33**
A. Parameter Lingkungan Pertumbuhan Tanaman dalam *Greenhouse* 33
C. Sistem Kontrol Irigasi dan Fertigasi di dalam *Greenhouse* 59
D. Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Udara dalam *Greenhouse* 68
BAB 4 PERAWATAN DAN REHABILITASI *GREENHOUSE* **83**
A. Perawatan *Greenhouse* 83
B. Rehabilitasi *Greenhouse* 86
DAFTAR PUSTAKA **91**
BIOGRAFI PENULIS **91**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. *Smart greenhouse* Polbangtan Bogor 2
Gambar 2. Perubahan radiasi gelombang pendek menjadi radiasi gelombang panjang dalam peristiwa ERK .4
Gambar 3. *Greenhouse* tipe *tunnel* cocok digunakan di daerah substropis 6
Gambar 4. Tipe *piggyback greenhouse* cocok untuk daerah tropis 7
Gambar 5. Tipe *multispan* cocok untuk kegiatan *greenhouse* yang luas 8
Gambar 6. Tipe-tipe *greenhouse* berdasarkan struktur atau model atap 9
Gambar 7. Budi daya selada di dalam *greenhouse* dengan sistem hidroponik 12
Gambar 8. Persiapan media tanam 12
Gambar 9. Struktur dasar pengendalian lingkungan *greenhouse* 40
Gambar 10. Sensor lingkungan: a) sensor DHT, b) sensor BH1750, c) sensor ultrasonik, d) sensor kelembapan tanah, dan e) sensor gas 45
Gambar 11. Sensor nutrisi: a) pendeteksi EC, b) pengukur pH, c) sensor DS18B20, dan d) sensor TDS 50
Gambar 12. Mikrokontroler pada sistem kontrol, a) Arduino Uno, b) ATmega 2560, ... 53
Gambar 13. Aktuator pada sistem kontrol: a) kipas, b) pompa nutrisi, c) *humidifier*, dan d) *peltier* 57
Gambar 14. Sistem irigasi dan fertigasi pada pertanian 60

Gambar 15. Sistem kontrol fertigasi dengan logika *Fuzzy* untuk tanaman hidroponik dengan sistem irigasi tetes 62
Gambar 16. Model jaringan saraf tiruan untuk pengendalian lingkungan budi daya tanaman melon secara hidroponik di dalam *greenhouse* 63
Gambar 17. *Timer* digital 64
Gambar 18. Tampilan *timer* untuk pengaturan setiap hari, a) "ON" setiap hari pada jam 17:30 dan b) "OFF" pada jam 05.00 66
Gambar 19. Sistem fertigasi melon pada *smart greenhouse* Polbangtan Bogor 67
Gambar 20. Sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika dengan model jaringan syaraf tiruan 70
Gambar 21. Sistem *monitoring greenhouse* berbasis *Internet of Things* 71
Gambar 22. Rangkaian sistem kontrol suhu dan kelembapan udara 72
Gambar 23. Skema sistem kontrol irigasi *drip* otomatis 75

BAB 1
KONSEP *GREENHOUSE*

A. Konsep *Greenhouse*

Greenhouse adalah bangunan pertanian yang dirancang untuk budi daya tanaman dengan kondisi lingkungan yang dapat dikontrol. *Greenhouse* awalnya hanya digunakan pada musim dingin atau awal musim semi, ketika sinar matahari hanya sedikit menyinari bumi, terutama di daerah dengan garis lintang tinggi. *Greenhouse* digunakan untuk menanam bunga, buah, tembakau, dan mengembangkan serangga serta lebah bombus (polinator).

Mula-mula pengembangan *greenhouse* banyak menggunakan plastik yang dilengkapi pengatur suhu dan distribusi air. Selanjutnya, penggunaan paranet mulai banyak diterapkan. Kini, telah berkembang versi paling murah yang digunakan di sekolah-sekolah di Indonesia, yaitu menggunakan rangka pipa aluminium, plastik untuk atap, dan kasa anti nyamuk untuk dinding.

Greenhouse biasanya memiliki atap yang terbuat dari bahan transparan seperti kaca atau plastik sehingga memungkinkan cahaya matahari masuk ke dalam *greenhouse*, sementara suhu, kelembapan, dan sirkulasi udara dapat diatur sesuai kebutuhan tanaman (Rizkiani *et al.,* 2020; Surya *et al.,* 2025). *Greenhouse* memungkinkan budi daya tanaman sepanjang tahun dengan menyediakan lingkungan yang optimal bagi tanaman dan meminimalkan pengaruh dari kondisi cuaca eksternal. Hal ini mendukung pertumbuhan

tanaman yang lebih cepat, peningkatan hasil panen, dan perlindungan tanaman dari serangan hama dan penyakit (Surya *et al.,* 2025).

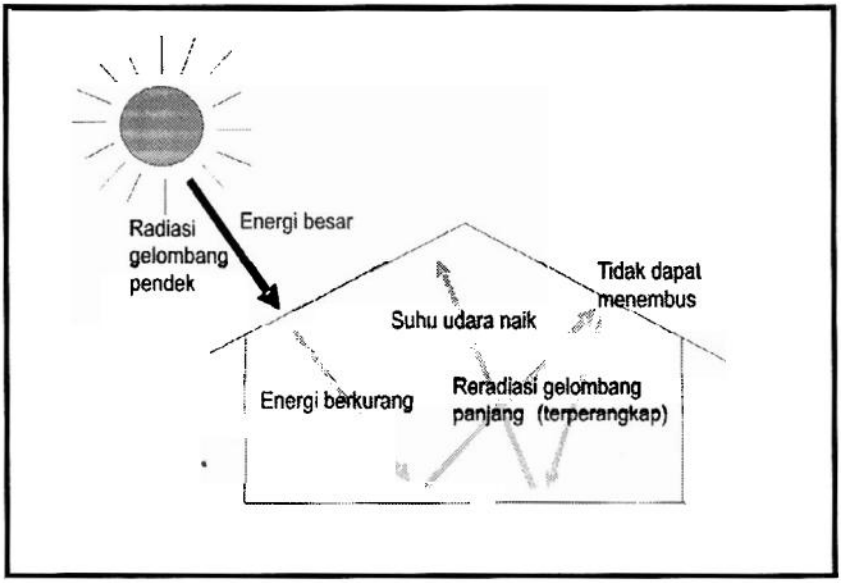
Seiring waktu, teknologi *greenhouse* terus mengalami perkembangan, mulai dari struktur yang sederhana hingga bangunan pertanian modern dengan sistem kontrol otomatis untuk suhu, kelembapan, cahaya, dan irigasi. Perkembangan teknologi *greenhouse* memungkinkan produksi tanaman yang lebih efisien dan berkelanjutan (Karina dan Subbiah, 2024). Salah satu *greenhouse* yang telah menerapkan sistem kontrol otomatis, yaitu *smart greenhouse* Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor (Polbangtan Bogor) seperti terlihat pada Gambar 1.

Gambar 1. *Smart greenhouse* Polbangtan Bogor
Sumber: Polbangtan Bogor, 2025

Struktur *greenhouse* yang berinteraksi dengan lingkungan luar dapat memberikan iklim mikro di dalam *greenhouse* berbeda dengan di luar *greenhouse*. Hal ini disebut dengan peristiwa *greenhouse effect* atau efek rumah kaca (ERK).

Berdasarkan hasil riset Bot (1983), ERK disebabkan oleh dua faktor. Pertama, struktur *greenhouse* yang tertutup dengan laju pertukaran udara yang kecil mengakibatkan pergerakan udara di dalam *greenhouse* relatif sedikit atau cenderung stagnan. Hal ini menyebabkan suhu udara di dalam *greenhouse* cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di luar.

Kedua, radiasi matahari gelombang pendek yang masuk ke dalam *greenhouse* melalui atap diubah menjadi radiasi gelombang panjang. Radiasi gelombang panjang ini tidak dapat keluar dari *greenhouse* dan terperangkap di dalamnya. Hal inilah yang menyebabkan ERK berdampak pada kenaikan suhu udara di dalam *greenhouse* (Gambar 2).



Gambar 2. Perubahan radiasi gelombang pendek menjadi radiasi gelombang panjang dalam peristiwa ERK
Sumber: Suhardiyanto, 2023

1. Prinsip dasar *greenhouse*

a. Pengendalian suhu

Suhu di dalam *greenhouse* diatur melalui sistem pemanas atau ventilasi. Pemanas digunakan pada musim dingin untuk menjaga suhu agar tetap hangat, sedangkan ventilasi atau kipas digunakan untuk mendinginkan ruangan saat suhu terlalu tinggi (Chimankare *et al.*, 2023).

b. Pengendalian kelembapan

Kelembapan diatur untuk memastikan tanaman mendapatkan kadar air yang cukup. Sistem pengairan dan

humidifier digunakan untuk menjaga kelembapan yang diperlukan, terutama bagi tanaman tropis yang membutuhkan kelembapan tinggi (Chen *et al.*, 2025).

c. Pencahayaan

Cahaya alami sangat penting dalam *greenhouse*, tetapi pencahayaan tambahan seperti lampu tumbuh (*artificial lights plant growth*) juga digunakan terutama pada musim dingin atau di area dengan sinar matahari terbatas (Chimankare *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2025).

d. Sirkulasi udara

Ventilasi yang baik penting untuk menghindari penumpukan panas dan kelembapan berlebih yang dapat menyebabkan masalah seperti pertumbuhan jamur atau penyakit tanaman. Ventilasi juga membantu distribusi karbon dioksida yang dibutuhkan dalam proses fotosintesis (Chimankare *et al.*, 2023; Chen *et al.*, 2025).

2. Klasifikasi *greenhouse*

a. Klasifikasi *greenhouse* berdasarkan teknologi yang digunakan menurut Mohamed *et al.* (2025) terbagi menjadi tiga kategori berikut ini.

1) *Greenhouse* sederhana (*low technology*)
2) Teknologi menengah (*medium technology*)
3) Teknologi tinggi (*high technology*)

b. Kementerian Pertanian dalam hal ini Ditjen Hortikultura (2021) membagi *greenhouse* berdasarkan konstruksi bangunan ke dalam beberapa kategori.

1) Tipe *tunnel*

Greenhouse tipe *tunnel* berbentuk seperti lorong setengah lingkaran dengan atap melengkung yang sangat efektif menghindari terpaan angin keras. Struktur kerangka dibuat dari pipa besi yang kuat. Tipe *tunnel* ini tidak cocok menggunakan struktur dari kayu karena membutuhkan lengkungan yang sangat kuat. Tipe ini banyak digunakan di daerah subtropis dan sangat efektif pada musim dingin dan salju.

Gambar 3. *Greenhouse* tipe *tunnel* cocok digunakan di daerah substropis

Sumber: Shree Siddhivinayak Green House, 2025

2) Tipe *piggyback greenhouse*

Tipe ini banyak digunakan di daerah tropis dengan banyak bukaan pada atapnya sebagai ventilasi untuk pertukaran udara dan mempertahankan suhu serta kelembapan udara. Tipe ini tidak disarankan di daerah dengan tiupan angin kencang.

Gambar 4. Tipe *piggyback greenhouse* cocok untuk daerah tropis
Sumber: Pustaka, 2019

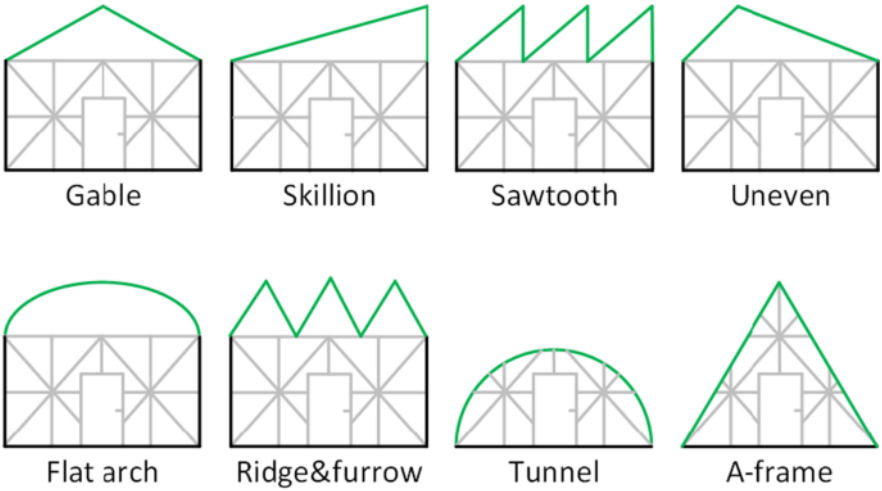
3) Tipe *multispan*

Tipe ini adalah campuran antara tipe *tunnel* dan tipe *piggyback*. Oleh karena itu, *greenhouse* tipe ini memiliki kelebihan dari tipe tunnel dan tipe *piggyback*, yaitu

strukturnya kuat tetapi memiliki ventilasi yang maksimal. Kelebihan lain dari tipe ini adalah beberapa unit *greenhouse* (*singlespan*) dapat disatukan menjadi satu blok *greenhouse* besar (*multispan*), yang sulit dilakukan pada *greenhouse* tipe terowongan. Jika dibandingkan dengan tipe *piggyback*, selain strukturnya lebih kuat, biaya pembuatan tipe campuran ini lebih hemat. Tipe *multispan* adalah tipe paling sesuai untuk kegiatan yang membutuhkan *greenhouse* luas.

Gambar 5. Tipe *multispan* cocok untuk kegiatan *greenhouse* yang luas
Sumber: ediskoe.blogspot.com, 2025

c. Berdasarkan struktur atau model atap, BSN (2010) mengklasifikasikan *greenhouse* menjadi beberapa tipe berikut ini.
   1) *Gable*
   2) *Skillion*
   3) *Sawtooth*
   4) *Uneven*
   5) *Flat arch*
   6) *Ridge & furrow*
   7) *Tunnel/Igloo*
   8) *A-frame*



Gambar 6. Tipe-tipe *greenhouse* berdasarkan struktur atau model atap
Sumber: Badan Standardisasi Nasional, 2010

d. Berdasarkan material konstruksi bangunan:
   1) *Greenhouse* bambu
   2) *Greenhouse* kayu
   3) *Greenhouse* besi

e. Berdasarkan bahan atap:
   1) *Acrylic*
   2) *Polycarbonate*
   3) *Fiberglass reinforced polyester*
   4) *Polyethylene film*
   5) *Polyvinyl chloride film*

Rangkuman

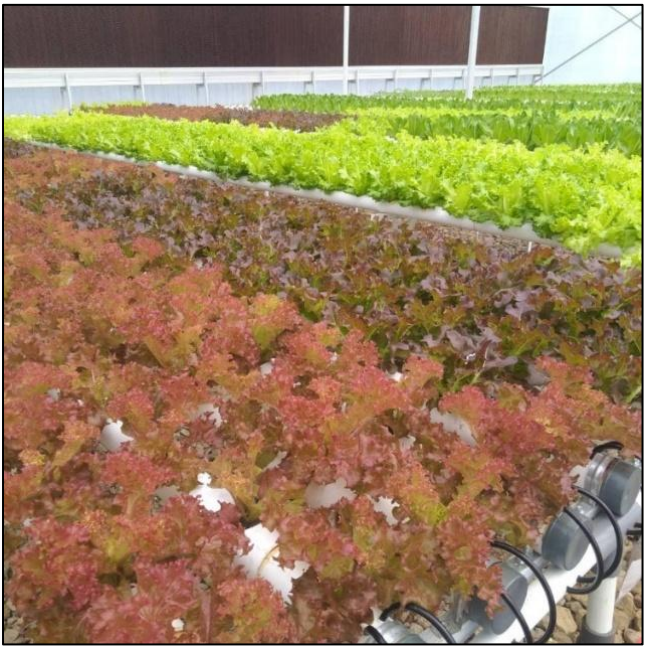
1. *Greenhouse* adalah bangunan pertanian yang digunakan untuk budi daya tanaman dengan kondisi lingkungan yang dapat dikontrol, seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan sirkulasi udara.
2. Prinsip dasar operasi *greenhouse* melibatkan pengendalian suhu, kelembapan, pencahayaan, dan sirkulasi udara untuk menciptakan lingkungan optimal bagi tanaman.
3. Jenis-jenis *greenhouse* dapat dikategorikan berdasarkan teknologi, segi konstruksi bangunan, struktur atap, material konstruksi bangunan, dan bahan atap yang masing-masing memiliki karakteristik dan aplikasi berbeda.
4. Keuntungan utama menggunakan *greenhouse* antara lain produksi sepanjang tahun, peningkatan hasil panen, serta pengurangan risiko serangan hama dan penyakit.

B. Budi Daya Tanaman di dalam *Greenhouse*

Sistem pertanian yang menggunakan *greenhouse* dapat memudahkan terjadinya kegiatan budi daya berbagai macam tanaman hortikultura. Penggunaan *greenhouse* di daerah tropis sangat memungkinkan dan memiliki banyak keuntungan dalam produksi dan budi daya tanaman (Stanghellini *et al.*, 2019). Beberapa kelebihan pemanfaatan teknologi *greenhouse* dalam budi daya tanaman adalah sebagai berikut.

1. Peningkatan hasil produksi.
2. Kualitas produksi yang lebih baik.
3. Pengurangan penggunaan pestisida.

Budi daya menggunakan *greenhouse* memudahkan dalam pengaturan kondisi lingkungan, seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan sirkulasi udara untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman. Komoditas yang dapat dibudidayakan di dalam *greenhouse* meliputi melon, cabai, tomat, sayuran daun, dan lain-lain. Budi daya di dalam *greenhouse* dapat dilakukan secara langsung dengan menanam di tanah atau menggunakan teknik hidroponik (Stanghellini *et al.*, 2019).



Gambar 7. Budi daya selada di dalam *greenhouse* dengan sistem hidroponik

Sumber: Polbangtan Bogor, 2025

Lokasi *greenhouse* harus dipilih dengan hati-hati untuk memaksimalkan penerimaan cahaya matahari dan sirkulasi udara yang baik. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan meliputi arah sinar matahari, perlindungan dari angin, dan akses air. Persiapan budi daya di *greenhouse* meliputi:

1. Pemilihan tanaman

Jenis tanaman yang akan dibudidayakan di dalam *greenhouse* perlu dipilih berdasarkan kebutuhan suhu, cahaya, dan kelembapan. Selain itu, pertimbangan tanaman yang komersial juga perlu diperhatikan, mengingat investasi dari bangunan

greenhouse cukup mahal dan perawatan pada budi daya *greenhouse* memerlukan SDM yang cukup handal.

Contoh tanaman yang cukup komersial dan banyak dibudidayakan di *greenhouse* antara lain selada, pakcoi/sawi, bayam hijau, bayam merah, kale, melon, tomat, paprika, cabai, mentimun, stroberi, anggrek, dan berbagai tanaman lainnya. Selanjutnya dalam menentukan varietas yang akan ditanam, perlu memperhatikan aspek teknis, aspek ekonomi, dan aspek pasar. Dalam aspek teknis, yang perlu di bahas adalah kecocokan varietas terhadap teknis budi dayanya, mulai dari kondisi lingkungan, media tanam, nutrisi, dan sistem hidroponik. Pada aspek pasar, perlu dibahas ada tidaknya komoditas tergantung pada preferensi konsumen dan bagaimana pemasarannya. Pada aspek ekonomi perlu dipelajari analisis kelayakan usaha dari budi daya tanaman secara hidroponik di *greenhouse*.

2. Persiapan media tanam

Media tanam adalah tempat tumbuhnya akar tanaman dan berperan penting dalam penyediaan nutrisi dan air. Budi daya tanaman di dalam *greenhouse* disarankan dengan metode hidroponik. Komposisi media tanam hidroponik yang baik adalah media yang mempunyai kapasitas menahan air yang tinggi. Hal ini memungkinkan tanaman dapat menyerap unsur hara lebih banyak untuk menunjang pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman sehingga pergerakan akar lebih leluasa.

Media tanam yang umum digunakan adalah *cocopeat* dan arang sekam. Perlakuan yang dilakukan untuk *cocopeat* yaitu mencuci untuk menghilangkan zat tanin. Setelah itu *cocopeat* dicampur dengan bakterisida untuk membunuh bakteri yang

terdapat pada *cocopeat* dan ditutup dengan terpal selama 7–14 hari. Kemudian *cocopeat* dicampur dengan arang sekam dan diaduk supaya merata sehingga media tanam siap digunakan. Dua hari sebelum tanam, dilakukan penyemprotan dengan menggunakan insektisida dan fungisida ke media tanam. Salah satu contoh persiapan media tanam *cocopeat* yang dicampur dengan arang sekam dalam dilihat pada Gambar 8 berikut.

Gambar 8. Persiapan media tanam
Sumber: Polbangtan Bogor, 2025

3. Sistem irigasi dan penyiraman

Sistem irigasi di dalam *greenhouse* harus dirancang untuk mendistribusikan air secara merata dan efisien. Berikut beberapa jenis sistem irigasi yang umum digunakan.

a. Irigasi tetes (*drip irrigation*)

   Sistem ini memberikan air dengan cara diteteskan, sehingga memberikan efektivitas yang tinggi karena dapat menekan banyaknya kehilangan air akibat rembesan maupun penguapan. Irigasi tetes cocok diaplikasikan untuk daerah yang beriklim kering dan mempunyai ketersediaan air terbatas. Efisiensi penggunaan air dengan sistem irigasi tetes dapat mencapai 80–95% (Simonne *et al*., 2010)

b. Irigasi *sprinkler*

   Sistem ini menerapkan prinsip penyemprotan air ke udara melalui perangkat *nozzle* sehingga air jatuh ke permukaan lahan dalam bentuk tetesan halus menyerupai curah hujan alami dan terdistribusi secara relatif merata pada area tanaman, baik untuk penyiraman maupun pendinginan. Sistem ini tersusun atas komponen utama berupa pompa, jaringan perpipaan, dan alat penyemprot yang dirancang untuk mengendalikan tekanan serta debit air sesuai dengan kebutuhan tanaman.

   Selain berfungsi sebagai media pemenuhan kebutuhan air tanaman, irigasi *sprinkler* juga berperan dalam pengaturan suhu mikroklimat tanaman, khususnya untuk menurunkan suhu lingkungan dan mengurangi stres panas pada kondisi cuaca ekstrem. Proses pendinginan terjadi melalui mekanisme penguapan air yang membantu menjaga suhu daun dan udara di sekitar tanaman tetap berada pada

kisaran optimum, sehingga mendukung keberlangsungan proses fisiologis tanaman secara normal. Sistem ini banyak diaplikasikan pada berbagai komoditas pertanian karena adaptif terhadap variasi kondisi lahan, meski kinerjanya dipengaruhi oleh faktor teknis seperti tekanan air, desain *sprinkler*, dan kondisi angin.

c. Sistem hidroponik

Sistem hidroponik merupakan budi daya tanaman menggunakan larutan nutrisi sebagai media tanam, yaitu akar tanaman yang langsung terendam dalam larutan tanpa menggunakan tanah. Kebutuhan air pada hidroponik lebih sedikit daripada kebutuhan air pada budi daya dengan tanah. Pada sistem hidroponik penggunaan air lebih efisien, sehingga cocok diterapkan pada daerah yang memiliki pasokan air yang terbatas (Haryanto D, 2018).

Kelebihan utama hidroponik adalah keberhasilan tanaman untuk tumbuh dan berproduksi lebih terjamin kualitas/mutunya. Kelebihan lainnya adalah perawatan lebih praktis, pemakaian pupuk lebih hemat, tanaman dapat tumbuh dengan pesat dan tidak kotor, hasil produksi lebih kontinu, serta beberapa jenis tanaman dapat dibudidayakan di luar musim (Lingga, 2005). Aspek air dan nutrisi pada hidroponik merupakan hal yang sangat penting dalam keberhasilan budi daya hidroponik.

4. Teknik budi daya di *greenhouse*

a. Penanaman benih atau bibit

Penanaman benih atau bibit harus dilakukan dengan jarak yang cukup untuk memungkinkan sirkulasi udara dan akses cahaya yang baik. Pemindahan bibit tanaman ke *polybag* sebaiknya dilakukan sore hari pada saat tanaman memasuki

usia 10–14 hari, dengan memastikan *polybag* dalam keadaan steril dari fungisida dan insektisida.

b. Pemeliharaan rutin

Pemeliharaan rutin merupakan kegiatan penting lainnya dalam budi daya tanaman di *greenhouse* yang bertujuan untuk menjaga pertumbuhan dan produktivitas tanaman secara optimal. Kegiatan yang perlu dilakukan antara lain, penyiraman, pemupukan, dan pemangkasan secara berkala untuk menjaga pertumbuhan tanaman. Pengendalian lingkungan di dalam *greenhouse* sebagai berikut.

1) Suhu di dalam *greenhouse* harus dikendalikan untuk menjaga suhu tetap dalam rentang ideal bagi tanaman yang dibudidayakan. Pengendalian suhu dilakukan melalui pengaturan ventilasi, penggunaan *shading*, dan sistem pendingin atau pemanas apabila diperlukan. Pengelolaan suhu yang tepat akan mendukung aktivitas fisiologis tanaman, seperti fotosintesis dan respirasi, sehingga pertumbuhan dapat berlangsung secara optimal.
2) Kelembapan udara perlu terus dipantau dan disesuaikan untuk menciptakan kondisi iklim mikro yang mendukung pertumbuhan tanaman. Pengaturan kelembapan dilakukan melalui sistem penyiraman atau *humidifier* dan pengelolaan ventilasi. Keseimbangan kelembapan udara yang baik akan membantu menjaga kesehatan tanaman dan meningkatkan efisiensi penyerapan air serta nutrisi.
3) Pengaturan intensitas cahaya harus terus diperhatikan karena sebagai sumber utama dalam proses fotosintesis. Selain cahaya matahari, penggunaan lampu tumbuh (*grow lights*) dapat membantu mencukupi kebutuhan cahaya, terutama pada musim hujan atau di daerah dengan

intensitas cahaya rendah. *Grow lights* dirancang untuk menghasilkan spektrum cahaya yang sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman, baik untuk pertumbuhan vegetatif maupun pembungaan.

4) Ventilasi yang baik diperlukan untuk mencegah penumpukan panas dan menjaga sirkulasi udara yang sehat. Ventilasi membantu menyeimbangkan suhu dan kelembapan, serta memastikan ketersediaan udara segar yang kaya oksigen dan karbon dioksida bagi tanaman. Sistem ventilasi dapat berupa ventilasi alami maupun mekanis seperti penggunaan kipas atau *exhaust fan*. Pengelolaan ventilasi yang efektif akan menciptakan lingkungan tumbuh yang sehat, mengurangi risiko penyakit, dan mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.

5. Panen dan penanganan pascapanen

Panen dan penanganan pascapanen merupakan tahapan akhir dalam proses produksi yang memerlukan perhatian khusus karena kualitas produk yang dihasilkan sangat ditentukan oleh ketepatan waktu panen serta metode penanganan yang diterapkan. Pelaksanaan panen pada tingkat kematangan yang sesuai dengan teknik penanganan yang baik bertujuan untuk meminimalkan kerusakan mekanis, kehilangan hasil, dan penurunan mutu produk. Penanganan pascapanen yang tepat, meliputi kegiatan sortasi, pembersihan, pengemasan, dan penyimpanan, berperan penting dalam mempertahankan kesegaran, penampilan, dan nilai jual produk sehingga mampu meningkatkan daya tarik serta kepercayaan konsumen.

Rangkuman

1. Kelebihan pemanfaatan teknologi *greenhouse* dalam budi daya tanaman meliputi peningkatan hasil produksi, kualitas produksi yang lebih baik, dan pengurangan penggunaan pestisida.
2. Budi daya di dalam *greenhouse* memungkinkan petani untuk menanam tanaman sepanjang tahun, meningkatkan produktivitas, dan mengurangi risiko hama serta penyakit.
3. Komoditas yang dapat dibudidayakan di *greenhouse* meliputi melon, cabai, tomat, sayuran daun, dan lain-lain.
4. Persiapan yang baik, termasuk pemilihan lokasi, jenis tanaman, media tanam, dan sistem irigasi, sangat penting untuk keberhasilan budi daya di *greenhouse*.
5. Teknik budi daya melibatkan penanaman, pemeliharaan, pengendalian lingkungan, dan pengendalian hama yang harus dilakukan secara rutin.

BAB 2

RANCANGAN *GREENHOUSE*

A. Struktur dan Konstruksi *Greenhouse*

Secara umum, struktur *greenhouse* dirancang untuk menahan beban dan kondisi lingkungan, seperti angin, hujan, dan suhu ekstrem, dengan tetap memaksimalkan penggunaan cahaya alami serta menjaga suhu dan kelembapan yang optimal bagi tanaman. Konstruksi *greenhouse* melibatkan pemilihan material yang tepat, seperti bahan kerangka dari bambu atau baja ringan, penutup atap dari plastik UV atau *fiberglass*, dan dinding dari paranet atau *screen net* (Balitbangtan, 2020).

1. Struktur *greenhouse*

a. Bagian atap
   Atap adalah bagian teratas dari *greenhouse* yang terdiri dari kuda-kuda, rangka atap, dan penutup. Fungsinya adalah melindungi bangunan dari kondisi iklim luar.

b. Bagian dinding dan lantai
   Dinding berfungsi melindungi bagian dalam *greenhouse* dari angin kencang, hujan, hama, dan penyakit tanaman. Lantai berfungsi sebagai pijakan untuk meletakkan elemen tambahan dalam *greenhouse*, seperti bedengan hidroponik dan tangki air.

c. Bagian fondasi
   Fondasi berfungsi untuk menyangga bagian atas *greenhouse* agar tetap stabil.

2. Konstruksi *greenhouse*

Bahan-bahan yang biasa digunakan dalam pembuatan *greenhouse*, antara lain:

a. Kerangka, material yang dapat digunakan antara lain bambu (karena memiliki harga yang lebih terjangkau dan ringan), balok kayu (untuk pemakaian 5–10 tahun), baja ringan (untuk pemakaian lebih dari 10 tahun/jangka panjang).
b. Atap dengan material *polyethylene* dengan UV, plastik UV, akrilik, polikarbonat, *reinforced fiberglass*.
c. Dinding sebaiknya menggunakan 2 lapis, yaitu *insect net* (minimal *mesh* 40) di bagian dalam dan plastik *polyester*.
d. Material lain, yaitu paku, tali, semen, pasir, batu bata atau batako.

Semua elemen ini disusun untuk memberikan kekuatan, ketahanan, dan fungsi yang diperlukan oleh bangunan. Hal-hal yang perlu diperhatikan menurut Kementan (2023) sebagai berikut.

1. Posisi *greenhouse*
   Greenhouse sebaiknya memanjang dari timur ke barat agar mendapatkan paparan panas matahari yang lebih lama pada siang hari.
2. Penempatan sumber cahaya buatan
   Jika menggunakan lampu atau penyinaran buatan di dalam *greenhouse*, pastikan posisinya dekat dengan tanaman.
3. Keamanan
   Greenhouse sebaiknya ditempatkan jauh dari pohon-pohon tinggi yang berpotensi tumbang, pohon besar yang menghalangi pergerakan udara, daerah yang memiliki kemiringan curam, dan tempat bermain anak-anak.

4. Pengaturan suhu
   Greenhouse sebaiknya dilengkapi dengan termometer untuk memantau suhu, kecuali *greenhouse* sudah dilengkapi dengan sistem ventilasi otomatis. Suhu udara di dalam *greenhouse* sebaiknya dijaga pada kisaran 18–25 °C (disesuaikan dengan jenis tanaman).
5. Ventilasi
   Sistem ventilasi harus bekerja dengan baik untuk menjaga suhu tetap dalam rentang ideal. Jika suhu di dalam *greenhouse* mulai meningkat terlalu tinggi, udara dingin dari luar harus dapat masuk untuk menetralkan suhu panas tersebut.

Rangkuman

Faktor penting dalam pembangunan *greenhouse* adalah posisi dan struktur. Posisi *greenhouse* yang memanjang dari timur ke barat akan mengoptimalkan penerimaan cahaya matahari sepanjang hari. Struktur *greenhouse* terdiri atas tiga bagian utama: atap, dinding dan lantai, serta fondasi. Material yang digunakan dalam konstruksi ini beragam, mulai dari bambu, baja ringan, hingga bahan penutup seperti plastik UV atau *fiberglass*. Ventilasi dan pengaturan suhu sangat penting untuk memastikan kondisi lingkungan dalam *greenhouse* tetap ideal bagi pertumbuhan tanaman.

B. Rancangan Fungsional *Greenhouse*

Greenhouse merupakan bangunan perlindungan tanaman yang mendukung proses budi daya di dalam ruangan dengan memanfaatkan cahaya matahari sebagai sumber utama untuk proses fotosintesis. Secara umum, rancangan fungsional

greenhouse mencakup pengaturan suhu, kelembapan, distribusi air, dan pencahayaan. Semua faktor ini dapat diatur secara manual atau otomatis untuk menciptakan kondisi yang ideal bagi pertumbuhan tanaman. Teknologi yang diterapkan melibatkan penggunaan bahan kaca atau plastik UV untuk menutupi seluruh bagian atap, dinding, dan permukaan *greenhouse*. Selain itu, *greenhouse* dilengkapi peralatan untuk mengatur suhu, kelembapan, distribusi air, dan pupuk, yang dapat dikendalikan secara otomatis melalui mikrokontroler.

Menurut BSN (2010) dalam SNI 7604:2010 tentang Bangunan Pertanian – Syarat Mutu Rumah Tanaman, rancangan fungsional menjelaskan tentang fungsi dari setiap bagian bangunan *greenhouse* dan cara sistem tersebut beroperasi. Rancangan fungsional biasanya dinyatakan dalam daftar fungsi dan terdiri atas dua aspek utama.

1. Fungsi operasional

Fungsi operasional menjelaskan kegunaan dan fungsi bagian-bagian *greenhouse* saat sistem beroperasi secara bersamaan untuk menciptakan lingkungan yang ideal. Ini meliputi operasi sistem pengaturan suhu, kelembapan, pencahayaan, dan distribusi air.

2. Fungsi pemeliharaan

Fungsi pemeliharaan meliputi hal-hal yang perlu diperhatikan atau dilakukan untuk menjaga sistem tetap dalam kondisi baik dan mencegah kerusakan. Pemeliharaan rutin diperlukan untuk memeriksa dan memperbaiki kerusakan pada peralatan, membersihkan sistem irigasi dan ventilasi, serta memastikan sistem kontrol otomatis berfungsi dengan benar.

Rancangan fungsional *greenhouse* melibatkan sejumlah elemen yang harus diatur dengan cermat untuk memastikan tanaman dapat tumbuh secara optimal. Aspek utama dari rancangan fungsional meliputi pengaturan suhu, kelembapan, distribusi air, dan pencahayaan. Setiap elemen ini berperan penting dalam menciptakan kondisi yang mendukung pertumbuhan tanaman dengan baik. Penjelasan terkait setiap bagian rancangan fungsional menurut Balitbangtan (2020) sebagai berikut.

1. Pengaturan suhu

Pengaturan suhu di dalam *greenhouse* adalah salah satu faktor kunci dalam rancangan fungsional. Suhu yang ideal bervariasi bergantung pada jenis tanaman yang dibudidayakan, tetapi umumnya suhu di dalam *greenhouse* perlu dijaga dalam rentang tertentu untuk memastikan pertumbuhan yang optimal. Teknologi yang sering digunakan untuk mengatur suhu meliputi hal berikut ini.

a. Sistem pemanas: digunakan untuk menjaga suhu tetap hangat selama musim dingin atau dalam kondisi cuaca dingin. Sistem ini dapat berupa pemanas listrik, gas, atau berbasis air panas.
b. Sistem pendingin: untuk mengatur suhu saat cuaca panas, gunakan kipas, pendingin evaporatif, atau sistem pendingin berbasis air untuk menurunkan suhu di dalam *greenhouse*.
c. Pengaturan otomatis: banyak *greenhouse* modern dilengkapi dengan kontrol suhu otomatis yang terhubung dengan sensor suhu. Sistem ini secara otomatis mengatur pemanas atau pendingin untuk menjaga suhu tetap dalam rentang yang diinginkan.

2. Pengaturan kelembapan

Kelembapan yang tepat sangat penting untuk pertumbuhan tanaman, terutama bagi tanaman tropis yang membutuhkan kelembapan tinggi. Pengaturan kelembapan dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa teknik berikut ini.

a. Sistem irigasi: sistem irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes dan *sprinkler*, dapat membantu menjaga kelembapan tanah di sekitar tanaman.
b. *Humidifier*: alat ini digunakan untuk menambah kelembapan udara dalam *greenhouse*, terutama pada musim kering atau di daerah dengan kelembapan rendah.
c. Ventilasi: sistem ventilasi membantu mengatur kelembapan dengan mengeluarkan udara lembap dan menggantinya dengan udara segar. Ini juga penting untuk mencegah penumpukan uap air yang dapat menyebabkan masalah seperti jamur atau penyakit tanaman.

3. Distribusi air dan pupuk

Sistem distribusi air dan pupuk sangat penting untuk memastikan tanaman mendapatkan nutrisi yang cukup. Teknologi yang digunakan meliputi berikut ini.

a. Sistem irigasi: sistem irigasi tetes dan *sprinkler* memastikan tanaman mendapatkan air secara merata. Sistem irigasi otomatis yang terintegrasi dengan sensor kelembapan dapat mengoptimalkan penggunaan air.
b. Sistem hidroponik: dalam sistem hidroponik, tanaman ditanam dalam larutan nutrisi, dan air serta nutrisi disuplai langsung ke akar tanaman. Ini memungkinkan pengaturan yang lebih presisi dalam hal nutrisi dan kelembapan.

c. Sistem fertigasi: menggabungkan irigasi dan pemupukan, sistem ini secara otomatis menyalurkan larutan nutrisi ke tanaman bersama dengan air irigasi.

4. Pencahayaan

Cahaya adalah elemen penting dalam fotosintesis dan pertumbuhan tanaman. *Greenhouse* dapat memanfaatkan cahaya alami dengan desain yang optimal, tetapi pencahayaan tambahan sering pula diperlukan.

a. Lampu tumbuh (*grow lights*)

Lampu ini digunakan untuk melengkapi cahaya matahari, terutama pada musim dingin atau di daerah dengan intensitas cahaya rendah. Ada berbagai jenis lampu tumbuh, seperti lampu fluoresen, LED, dan HID (*High-Intensity Discharge*).

b. Pengaturan intensitas cahaya

Sistem kontrol pencahayaan otomatis dapat mengatur intensitas dan durasi pencahayaan berdasarkan kebutuhan tanaman dan waktu dalam sehari.

5. Implementasi dan teknologi

Greenhouse modern sering dilengkapi dengan teknologi canggih untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas, seperti:

a. Mikrokontroler: digunakan untuk mengontrol berbagai sistem otomatis di *greenhouse*, termasuk suhu, kelembapan, pencahayaan, dan irigasi. Mikrokontroler dapat diprogram untuk merespons perubahan kondisi secara *realtime*.

b. Sensor: sensor suhu, kelembapan, dan cahaya digunakan untuk memantau kondisi lingkungan dan memberikan data yang diperlukan untuk sistem kontrol otomatis.
c. Sistem monitoring jarak jauh: teknologi ini memungkinkan pemantauan dan pengendalian *greenhouse* dari jarak jauh menggunakan perangkat seperti gawai canggih atau komputer.

Rangkuman

Rancangan fungsional *greenhouse* bertujuan untuk memastikan bahwa setiap bagian dari *greenhouse* berfungsi secara optimal untuk mendukung budi daya tanaman. *Greenhouse* dilengkapi dengan teknologi pengaturan suhu, kelembapan, distribusi air, dan pupuk yang dapat dikendalikan secara otomatis. Rancangan fungsional terdiri atas dua aspek utama: fungsi operasional, yang berkaitan dengan cara kerja sistem, dan fungsi pemeliharaan, yang memastikan sistem tetap berfungsi dengan baik dan mencegah kerusakan.

C. Rancangan Struktural *Greenhouse*

Menurut Morib (2012), konstruksi *greenhouse* terdiri dari bagian-bagian yang saling menopang dan mendukung satu sama lain untuk menahan beban dan memberikan kekuatan serta kekakuan pada bangunan. Struktur bangunan yang baik harus memenuhi kebutuhan struktural sehingga menciptakan kondisi yang aman dan nyaman bagi penggunanya. Keamanan struktur bangunan harus memerhatikan sifat fisik dan mekanik bahan yang digunakan, serta mempertimbangkan faktor keselamatan sesuai dengan BSN (2010) dengan nomor SNI

7604:2010 tentang Bangunan Pertanian - Syarat Mutu Rumah Tanaman.

Penentuan kelayakan *greenhouse* dapat dilakukan dengan menganalisis setiap komponen utama struktur untuk menilai kekuatan dan kekakuan bangunan dalam memberikan stabilitas struktural (von Zabeltitz, 2011). Analisis struktur perlu dilakukan untuk memastikan bahwa gaya-gaya yang terjadi pada konstruksi tidak melebihi nilai yang diizinkan berdasarkan persyaratan teknis bahan, sehingga bangunan tidak mengalami kerusakan signifikan dan dapat dinyatakan layak.

Konstruksi dan rancangan struktural *greenhouse* memegang peranan penting dalam keberhasilan budi daya tanaman, karena struktur yang kokoh dan berfungsi dengan baik dapat memastikan kestabilan dan keandalan bangunan.

1. Struktur utama *greenhouse*

Secara umum, struktur *greenhouse* terdiri atas beberapa komponen utama yang memiliki peran penting dalam memberikan kekuatan dan stabilitas.

a. Atap merupakan elemen yang menutupi bagian atas *greenhouse* dan melindungi tanaman dari cuaca eksternal. Atap *greenhouse* sering terbuat dari bahan transparan, seperti plastik UV, akrilik, atau *fiberglass*, yang memungkinkan masuknya cahaya matahari ke dalam ruangan. Struktur atap harus cukup kuat untuk menahan beban salju, hujan, dan angin. Selain itu, atap yang baik sebaiknya mampu membuat *run-off* air hujan dengan kemiringan umumnya minimal 28 derajat

b. Dinding *greenhouse* berfungsi untuk melindungi bagian dalam dari angin kencang, hujan, serta gangguan hama

dan penyakit. Bahan yang sering digunakan adalah paranet atau *screennet*, yang memungkinkan ventilasi berjalan dengan baik namun tetap melindungi tanaman dari faktor eksternal yang merugikan.

c. Fondasi adalah bagian yang menyokong struktur atas dan harus dirancang untuk menahan beban yang diterima oleh *greenhouse*. Fondasi yang baik memastikan stabilitas bangunan, mencegah pergeseran, dan mendukung seluruh struktur agar tetap kokoh.

2. Konstruksi dan material

Pemilihan material yang tepat adalah kunci dalam konstruksi *greenhouse*.

a. Kerangka *greenhouse* umumnya terbuat dari berbagai bahan, seperti bambu, baja ringan, atau balok kayu. Bambu dan baja ringan sering dipilih karena kekuatan dan ketahanannya terhadap korosi. Pemilihan material kerangka harus mempertimbangkan daya tahan terhadap kondisi cuaca setempat.

b. Penutup atap dapat berupa plastik UV, akrilik, atau *fiberglass*. Bahan penutup atap harus memiliki ketahanan terhadap UV dan perubahan suhu untuk memastikan umur panjang dan efektivitas.

c. Dinding dan penutup lainnya dapat terbuat dari bahan seperti paranet atau *screennet* yang memungkinkan sirkulasi udara berjalan dengan baik, sekaligus melindungi tanaman dari hama. Material ini harus dirancang untuk memaksimalkan ventilasi dengan risiko kerusakan yang minimal.

3. Analisis struktural

Analisis struktural merupakan proses penting untuk menentukan kekuatan dan kekakuan *greenhouse* yang meliputi berikut ini.

a. Penilaian beban
   Mengidentifikasi berbagai beban yang akan diterima oleh *greenhouse*, termasuk beban salju, hujan, dan angin. Beban ini harus dibandingkan dengan kapasitas material yang digunakan untuk memastikan bahwa struktur dapat menahan beban tersebut tanpa mengalami kerusakan.

b. Kekuatan material
   Memastikan bahan yang digunakan memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban yang diterima. SNI 7604:2010 memberikan pedoman tentang syarat mutu bahan yang harus dipenuhi.

c. Kestabilan struktural
   Menilai cara berbagai bagian dari struktur saling menopang untuk memberikan stabilitas keseluruhan. Hal ini termasuk menganalisis sambungan dan integritas struktural untuk memastikan bahwa tidak ada bagian yang mengalami tekanan berlebihan.

4. Kesesuaian dengan standar

Menurut SNI 7604:2010, desain dan konstruksi *greenhouse* harus memenuhi standar mutu tertentu, antara lain berikut ini.

a. Kualitas material
   Bahan yang digunakan harus memenuhi spesifikasi teknis untuk memastikan ketahanan dan keamanan.

b. Desain struktural
   Struktur harus dirancang untuk memenuhi standar kekuatan dan kestabilan yang ditetapkan.

c. Pengujian dan verifikasi
   Melakukan pengujian untuk memastikan bahwa semua komponen memenuhi persyaratan dan berfungsi sesuai dengan desain.

Rangkuman

Struktur *greenhouse* harus dirancang untuk memberikan kekuatan dan kekakuan yang memadai, memastikan stabilitas struktural yang aman dan nyaman bagi penggunanya. Konstruksi yang baik harus memperhatikan sifat fisik dan mekanik material yang digunakan serta mematuhi standar yang telah ditetapkan, seperti SNI 7604:2010. Analisis struktural diperlukan untuk memastikan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada konstruksi berada dalam batas aman, sehingga *greenhouse* tidak mengalami kerusakan yang signifikan.

BAB 3

PENGENDALIAN LINGKUNGAN DI DALAM *GREENHOUSE*

A. Parameter Lingkungan Pertumbuhan Tanaman dalam *Greenhouse*

Parameter lingkungan di dalam *greenhouse* memainkan peran penting dalam tumbuh kembang tanaman. Faktor-faktor lingkungan ini berpengaruh pada reaksi seluler tanaman dan kelangsungan hidup tanaman. Faktor-faktor fisik yang memengaruhi tanaman, meliputi cahaya, suhu udara, kelembapan udara, kadar CO_2, kecepatan angin, polutan, dan kondisi lingkungan akar (von Zabeltitz, 2010; Castilla, 2013; Taiz *et al.,* 2015; Yowono *et al.,* 2017; Rukmana, 2018; Kementan, 2020).

1. Cahaya matahari

Cahaya matahari merupakan faktor lingkungan utama yang menentukan keberhasilan budi daya tanaman di dalam *greenhouse* karena berperan langsung sebagai sumber energi bagi proses fotosintesis. Cahaya tampak, dengan panjang gelombang antara 390 hingga 700 nm sangat penting bagi tanaman. Intensitas, durasi, dan kualitas spektrum cahaya yang diterima tanaman akan memengaruhi laju fotosintesis, pertumbuhan vegetatif, pembungaan, hingga pembentukan hasil panen. Berbeda dengan lahan terbuka, kondisi lingkungan *greenhouse* memungkinkan cahaya matahari dimodifikasi melalui material penutup (sistem peneduh), dan pencahayaan tambahan, sehingga ketersediaan cahaya dapat dikendalikan

sesuai kebutuhan tanaman. Beberapa faktor pencahayaan di dalam *greenhouse* dijelaskan sebagai berikut.

a. Cahaya adalah sumber energi utama fotosintesis

   Fotosintesis hanya berlangsung pada rentang spektral fotosintetik (PAR, 400 hingga 700 nm). Besarnya Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD pada satuan $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) yang diterima kanopi menentukan laju fotosintesis sesaat dan komulatif sehingga memengaruhi biomassa serta hasil panen. Sejumlah studi menunjukkan bahwa ketersediaan PAR membatasi atau meningkatkan perkembangan vegetatif dan reproduktif tanaman (Balázs and Kovács, 2025).

b. Rentang PPFD optimal yang bergantung jenis dan fase pertumbuhan

   Data penelitian menunjukkan nilai PPFD optimal berbeda antartanaman, nilainya hingga kisaran ratusan $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. Misalnya, PPFD 160 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ akan dominan menghasilkan sifat fisiologis terbaik pada kondisi tanaman tertentu (Balázs and Kovács, 2025).

c. Jumlah dan distribusi cahaya memengaruhi hasil panen

   Beberapa studi kuantitatif pada tomat dan sayuran menunjukkan bahwa *cumulative solar radiation* sebelum fase berbunga merupakan prediktor kuat terhadap hasil panen akhir. Pembatasan intensitas cahaya secara signifikan akan menurunkan fotosintesis, pertumbuhan, dan hasil buah. Dengan demikian, pengurangan PAR (karena pemasangan *shading*, atau pemasangan panel PV di atap *greenhouse* dapat menurunkan produksi tanaman secara proporsional (Higashide, 2009).

2. Suhu udara

Suhu udara merupakan parameter lingkungan di dalam sistem *greenhouse* yang sangat penting untuk kelangsungan proses fisiologis tanaman, seperti fotosintesis, respirasi, transpirasi, dan aktivitas enzim. Suhu udara di dalam *greenhouse* dipengaruhi oleh beberapa mekanisme pindah panas, seperti radiasi matahari yang masuk melalui ventilasi, sistem *cooling pad*, konveksi panas akibat pergerakan udara, laju evaporasi dan transpirasi tanaman, serta kondisi lingkungan eskternal (suhu udara, kecepatan, dan arah angin).

Hubungan antara suhu udara dan pertumbuhan tanaman bersifat kompleks dan dinamis karena setiap jenis tanaman memiliki rentang suhu minimum, optimum, dan maksimum yang berbeda. Suhu yang berada di bawah atau di atas kisaran optimum dapat menyebabkan stres fisiologis, penurunan laju fotosintesis, gangguan pembungaan, hingga penurunan hasil panen. Tabel 1 memuat hubungan kuantitatif antara suhu udara dan respons fisiologis tanaman yang sering digunakan dalam penelitian-penelitian tentang tata kelola *greenhouse*.

Tabel 1. Hubungan kuantitatif antara suhu udara dan respons fisiologis tanaman

Suhu udara (°C)	Kondisi fisiologis tanaman	Dampak terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman
<10	Metabolisme sangat lambat	Pertumbuhan terhambat, risiko kerusakan pada jaringan

Suhu udara (°C)	Kondisi fisiologis tanaman	Dampak terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman
10–18	Suboptimal rendah	Pertumbuhan lambat, pembungaan tertunda
20–28	Optimum (umum *greenhouse* tropis)	Fotosintesis maksimal, pertumbuhan optimal
29–35	Suboptimal tinggi	Transpirasi meningkat, stres awal
>35	Stres panas berat	Bunga rontok, daun layu, hasil panen menurun

3. Kelembapan udara (*Relative Humidity*/RH)

Kelembapan udara adalah perbandingan antara jumlah uap air dalam udara dan jumlah uap air maksimum yang dapat ditampung udara pada suhu dan tekanan yang sama. Kelembapan udara dipengaruhi oleh suhu udara dalam *greenhouse*, laju migrasi uap air dari tanaman atau tanah ke udara, dan transpirasi tanaman. Kelembapan yang terlalu rendah atau tinggi dapat memengaruhi kesehatan tanaman, dengan rentang RH ideal berada di kisaran 25% hingga 80%.

4. Kadar karbon dioksida

Ketersediaan CO_2 dalam *greenhouse* tidak terbatas. Di *greenhouse* yang tertutup rapat, konsentrasi CO_2 dapat turun menjadi 150 hingga 200 ppm setelah cahaya tersedia. Untuk mengatasi penurunan kadar CO_2, dilakukan pengayaan CO_2 (*enrichment*).

5. Kecepatan udara

Kecepatan udara dalam *greenhouse* memengaruhi laju transpirasi, evaporasi, dan kadar CO_2. Pergerakan udara yang

baik membantu mendistribusikan CO_2 dan mengatur kelembapan serta suhu.

6. Polutan

Polutan seperti etilen, SO_2, flor, amonia, pestisida, ozon, dan *peroxyacetyl nitrate* (PAN) dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman. Polutan ini perlu dikendalikan untuk mencegah dampak negatif pada tanaman.

7. Lingkungan perakaran

Lingkungan perakaran adalah area di sekitar akar tanaman yang berfungsi sebagai media tanam. Media yang umum digunakan termasuk sabut kelapa, vermikulit, *rockwool*, dan perlit.

Faktor-faktor lingkungan harus diatur secara optimal di dalam *greenhouse* untuk menciptakan kondisi pertumbuhan terbaik bagi tanaman. Dengan pemahaman dan kontrol yang tepat, *greenhouse* dapat mendukung pertumbuhan tanaman yang cepat, sehat, dan berkualitas tinggi. Untuk memastikan faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman, perlu dilakukan pengumpulan data. Data ini meliputi parameter iklim mikro dan parameter pertumbuhan tanaman di dalam dan luar *greenhouse*.

1. Suhu udara

Pengukuran suhu udara di dalam dan di luar *greenhouse* penting diamati untuk memastikan kondisi internal dan eksternal *greenhouse* sesuai dengan pertumbuhan tanaman. Suhu udara yang optimal adalah 24°C–30°C, kecuali untuk tanaman tertentu yang dapat tumbuh di luar kondisi suhu udara tersebut. Suhu udara yang terlalu rendah dapat menghambat metabolisme tanaman dan memperlambat

pertumbuhan tanaman, sedangkan suhu udara yang terlalu panas dapat menyebabkan tanaman layu dan stres serta menurunkan kelembapan dan memengaruhi transpirasi tanaman. Pengukuran suhu dapat dilakukan dengan menggunakan sensor yang terpasang di *greenhouse*. Data dari sensor ini dikirim dan terekam di komputer server secara otomatis dan periodik pada waktu yang ditentukan. Dalam hal ini, *weather station* digunakan sebagai alat yang banyak digunakan untuk mengukur parameter lingkungan terutama di luar *greenhouse*.

2. Kelembapan udara (RH)

Pengamatan kelembapan berfungsi untuk mengoptimalkan kondisi kelembapan yang tidak sesuai dengan lingkungan di dalam *greenhouse*. Kondisi paling umum yang dapat terjadi apabila kondisi internal *greenhouse* memiliki kelembapan di atas 70% adalah mendorong pertumbuhan jamur, bakteri, dan patogen yang dapat menyebabkan busuk akar dan daun. Pengamatan kelembapan udara dilakukan dengan mengakses data yang terekam di server komputer dan *weather station*. Sedangkan pengamatan dengan sensor dapat dilakukan dengan pemasangan sensor yang hasilnya akan dikirim dan terekam di komputer server secara otomatis dan periodik pada waktu yang ditentukan.

3. Intensitas radiasi matahari

Intensitas radiasi matahari di dalam *greenhouse* berpengaruh langsung pada peningkatan suhu udara (energi *thermal*) dan laju fotosintesis. Intensitas yang rendah menyebabkan laju fotosintesis tidak maksimal, sedangkan intensitas yang berlebih perlu dikontrol salah satunya dengan menggunakan naungan. Intensitas radiasi matahari diukur dengan sensor yang

diletakkan di dalam *greenhouse* dan dibaca melalui komputer server serta *weather station* yang diletakkan di luar *greenhouse*.

Rangkuman

1. Parameter pertumbuhan tanaman di dalam *greenhouse* mencakup faktor cahaya, suhu udara, kelembapan udara, kadar CO_2, kecepatan angin, polutan, dan lingkungan akar.
2. Parameter iklim mikro meliputi suhu udara, kelembapan udara, kecepatan udara, dan intensitas radiasi matahari di dalam dan luar *greenhouse*.

B. Sistem Kontrol Lingkungan di dalam *Greenhouse*

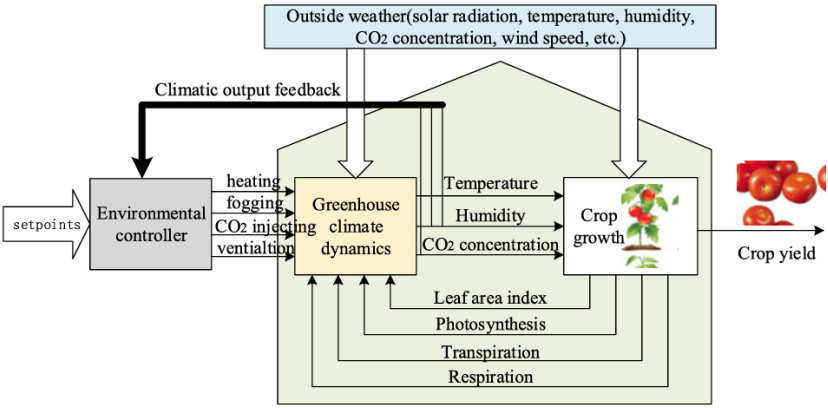
Sistem kontrol pada *greenhouse* merupakan serangkaian perangkat yang saling terintegrasi sehingga dapat digunakan untuk memantau dan mengontrol lingkungan di dalam *greenhouse* dengan tujuan menciptakan lingkungan kondisi tumbuh yang optimal bagi tanaman (Baille, 2015; Kumar dan Kalbende, 2016; Shamsiri *et al.,* 2018; Rukmana, 2018; Kementan, 2020; Singh dan Raghavendra, 2020).

1. Konsep dasar sistem kontrol

Sistem kontrol di dalam *greenhouse* merupakan sistem pengendalian lingkungan berbasis umpan balik (*closed-loop control*) yang bertujuan untuk menjaga kondisi iklim mikro agar tetap berada pada rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman. Parameter lingkungan utama yang dikendalikan meliputi suhu dan kelembapan udara, intensitas cahaya matahari, konsentrasi CO_2, suhu perakaran, dan kelembapan media tanam. Sistem kontrol bekerja secara otomatis dengan memanfaatkan sensor sebagai alat ukur kondisi aktual, *controller* sebagai pusat pengolah data dan pengambil

keputusan, serta aktuator sebagai perangkat pengoreksi kondisi lingkungan.

Secara konseptual, sistem kontrol *greenhouse* dirancang untuk mengurangi penyimpangan (*error*) antara nilai aktual parameter lingkungan dengan nilai acuan (*set point*) yang telah ditentukan berdasarkan kebutuhan fisiologis tanaman (Laumal, 2023). Struktur dasar pengendalian di dalam greenhouse sebagaimana diberikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur dasar pengendalian lingkungan *greenhouse*
Sumber: Y. Su et al., 2020

Sistem kontrol *greenhouse* terdiri dari beberapa komponen utama berikut ini.

a. *Set point*

Set point adalah nilai target parameter lingkungan, misalnya suhu udara 26–28 °C, kelembapan udara 65–75%, intensitas cahaya matahari 200–600 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (tergantung tanaman).

Dalam pengaturan nutrisi, *set point* nilai EC dan pH yang diinginkan di angka 1000 PPM atau minimal 7. Nilai-nilai *set point* ini biasanya ditentukan berdasarkan hasil penelitian agronomi dan fisiologi tanaman. Kontroler pada perangkat kendali akan berusaha menjaga kondisi lingkungan dan tanaman agar selalu berada di antara nilai *set point* atau tepat berada pada nilai *set point*.

b. Rentang

Merupakan kisaran nilai yang dapat diterima atau diizinkan untuk suatu variabel dalam sistem. Rentang ini mencakup variasi nilai yang masih dapat diterima sebelum sistem dianggap keluar dari kontrol atau berada dalam kondisi yang tidak diinginkan. Dalam banyak kasus, rentang didefinisikan seputar *set point* untuk menentukan batas-batas nilai yang masih dapat diterima. Misalnya, jika *set point* nilai EC adalah 600–900 ppm, maka sistem kontrol akan mengatur nilai EC pada rentang 600–900 ppm. Jika EC<600 ppm maka pompa larutan untuk menaikkan EC akan menyala, sedangkan jika EC >900 ppm maka pompa air baku akan menyala.

c. Sensor

Sensor merupakan perangkat elektronik yang mendeteksi dan mengukur perubahan besaran fisik maupun kimia di lingkungan. Hasil deteksi tersebut diubah menjadi sinyal listrik yang dapat diolah oleh sistem pengendali, seperti mikrokontroler, komputer, atau sistem kontrol otomatis. Dalam sistem *greenhouse*, sensor menjadi komponen fundamental karena berperan sebagai sumber informasi (*input system*) yang merepresentasikan kondisi iklim mikro secara aktual. Parameter lingkungan *greenhouse* yang umumnya diukur meliputi suhu udara, kelembapan udara, intensitas cahaya

matahari, kadar CO2, suhu *perakaan*, dan kelembapan media tanam. Hasil pengukuran sensor inilah yang kemudian menjadi dasar pengambilan keputusan pada sistem kontrol tertutup (*closed-loop control*) untuk menjaga kondisi lingkungan *greenhouse* agar tetap berada pada rentang optimal bagi pertumbuhan tanaman atau *set point* yang sudah ditetapkan.

Sensor secara fungsional memiliki dua peran utama. Pertama, deteksi dan pengukuran, yaitu mendeteksi perubahan parameter lingkungan dan mengukurnya dengan tingkat akurasi tertentu. Sensor mengonversi besaran nonlistrik (misalnya suhu udara atau cahaya matahari) menjadi sinyal listrik berupa tegangan listrik, arus listrik, atau sinyal digital yang proporsional terhadap nilai parameter yang diukur.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sensor suhu dan kelembapan udara digital pada *greenhouse* mampu memberikan resolusi pengukuran hingga ±0,5 °C untuk suhu udara dan ±2–3% untuk kelembapan relatif udara, yang sudah memadai untuk aplikasi kontrol lingkungan pertanian (Shamshiri et al., 2018). Sensor sebagai transmisi informasi, yaitu pengiriman data hasil pengukuran ke unit pengolah data (mikrokotroler) melalui media kabel maupun nirkabel. Pada *greenhouse* modern/*smart greenhouse*, data sensor sering dikirim secara *realtime* ke sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) untuk diproses/dianalisis dan disimpan sebagai dasar pengambilan keputusan jangka panjang (misalnya melibatkan *machine learning*/ML).

Jenis sensor yang digunakan dalam *greenhouse* dapat diklasifikasikan sebagai sensor lingkungan yang berfungsi untuk mengukur kondisi iklim mikro dan parameter pendukung pertumbuhan tanaman di dalam *greenhouse*.

Contoh: sensor DHT11/DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan udara, sensor BH1750 untuk mengukur intensitas cahaya, *soil moisture* sensor untuk mengukur kelembapan tanah dan ketersediaan air pada media tanam, sensor ultrasonik untuk pengukuran jarak atau ketinggian air, sensor gas MQ-2 untuk mendeteksi asap atau gas tertentu di dalam *greenhouse*, serta sensor warna GY-31 untuk identifikasi warna objek atau daun tanaman.

Berbagai penelitian memberi informasi bahwa integrasi antara sensor lingkungan dalam *greenhouse* mampu meningkatkan stabilitas iklim mikro hingga ±1–2 °C untuk suhu udara dan ±5% untuk kelembapan relatif udara, serta mendukung peningkatan hasil panen sebesar 20–30% dibanding dengan sistem *greenhouse* tanpa melibatkan sensor untuk pemantauan lingkungan (Körner & Challa, 2003; Jones et al., 2019).

Jenis-jenis sensor pada *greenhouse* antara lain sebagai berikut.

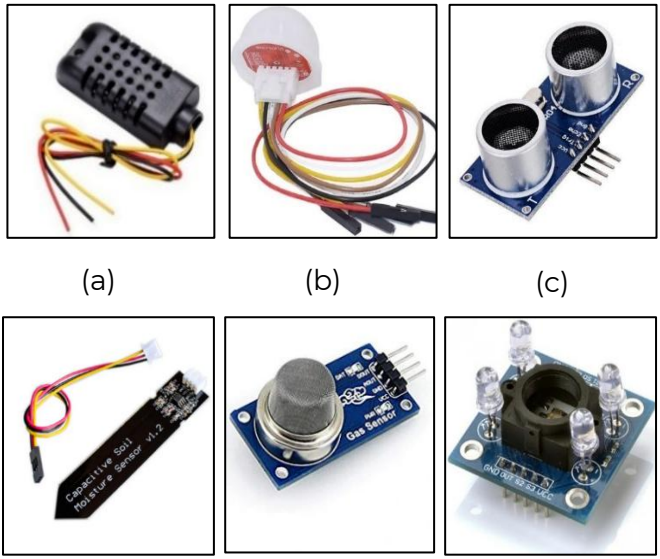
1) Sensor lingkungan

Sensor lingkungan berfungsi untuk mengukur kondisi iklim mikro dan parameter pendukung di dalam *greenhouse* yang secara langsung maupun tidak langsung memengaruhi pertumbuhan tanaman. Parameter utama yang diukur meliputi suhu dan kelembapan udara, intensitas cahaya matahari, kelembapan media tanam, suhu perakaran, keberadaan gas lain seperti CO2, serta karakteristik visual tanaman. Data yang dihasilkan oleh sensor lingkungan menjadi input utama dalam sistem kontrol tertutup (*closed-loop control*) untuk menentukan aksi aktuator seperti kipas (*fan*), *sprayer*, pompa irigasi, atau sistem pencahayaan tambahan. Pemilihan sensor harus mempertimbangkan rentang pengukuran, akurasi,

resolusi, waktu respons, dan kemudahan integrasi dengan sistem kendali berbasis mikrokontroler.

Secara umum, sensor lingkungan yang banyak digunakan pada sistem *greenhouse* untuk aktivitas perkuliahan (pendidikan) dan penelitian meliputi sensor DHT11/22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan udara, BH1750 untuk pengukuran intensitas cahaya matahari, sensor ultrasonik untuk pengukuran jarak atau ketinggian air di dalam tandon nutrisi, *soil moisture* sensor untuk mengukur kelembapan tanah dan mengetahui kadar air dalam media tanam, sensor gas MQ-2 untuk mendeteksi asap atau gas mudah terbakar, serta sensor warna GY-31 untuk identifikasi warna objek atau bagian tanaman.

Penggunaan sensor-sensor lingkungan secara terintegrasi mampu meningkatkan stabilitas iklim mikro di dalam *greenhouse* dan mendukung proses pengambilan keputusan berbasis data dalam sistem kontrol *greenhouse* modern. Beberapa sensor standar yang digunakan pada proses pembelajaran mahasiswa dan penelitian di dalam *greenhouse* sebagaimana diberikan pada berikut.



Gambar 10. Sensor lingkungan: a) sensor DHT, b) sensor BH1750, c) sensor ultrasonik, d) sensor kelembapan tanah, dan e) sensor gas

Sumber: aliexpress.com, 2025

Tabel 2. Karakteristik sensor lingkungan

No	Jenis sensor	Parameter yang diukur	Rentang & akurasi (umum)	Karakteristik teknis	Aplikasi di *greenhouse*
1	Sensor DHT (DHT11/DHT22)	Suhu dan kelembapan udara	Suhu: −40 hingga 80 °C (±0,5 °C). RH: 0–100% (±2–5%)	*Output* digital, kalibrasi pabrik atau manual, mudah diintegrasikan	Kontrol suhu dan kelembapan udara, pemantauan iklim mikro

No	Jenis sensor	Parameter yang diukur	Rentang & akurasi (umum)	Karakteristik teknis	Aplikasi di *greenhouse*
2	BH1750	Intensitas cahaya	1–65.535 lux, resolusi tinggi	Sensor digital I^2C, respon linier	Pemantauan intensitas cahaya matahari dan pencahayaan tambahan
3	Sensor ultrasonik (HC-SR04)	Jarak	2–400 cm, akurasi ±3 mm	Berbasis gelombang ultrasonik, nonkontak	Pengukuran tinggi air nutrisi di dalam tandon
4	Sensor kelembapan tanah	Kadar air media tanam	*Output analog*/ digital (relatif)	Tipe resistif/kapasitif, respons cepat	Otomasi irigasi dan manajemen irigasi
5	Sensor gas MQ-2	Asap dan gas (LPG, CH_4, H_2)	Deteksi kualitatif –semi kuantitatif	Memerlukan pemanasan awal, sensitif	Keamanan *greenhouse*
6	Sensor warna GY-31 (TCS3200)	Warna objek	RGB (frekuensi *output*)	Filter RGB, *output* frekuensi	Identifikasi warna buah

Data hasil pengukuran dari setiap sensor lingkungan digunakan sebagai umpan balik dalam sistem kontrol *greenhouse*. Contohnya ketika terjadi kenaikan suhu udara yang terdeteksi oleh sensor DHT, maka akan memicu aktivasi dari kipas (*fan*) atau terbukanya lubang ventilasi udara. Sementara, ketika terjadi penurunan kelembapan tanah yang terukur oleh *soil moisture* sensor, maka akan mengaktifkan pompa irigasi sehingga air akan terdistribusi ke tanaman. Integrasi antara sensor lingkungan yang tepat di dalam *greenhouse* akan mampu menjaga fluktuasi suhu udara pada kisaran ±1–2 °C dan kelembapan relatif udara pada ±5%, yang

akan berdampak positif terhadap tumbuh kembang tanaman dan hasil produksinya.

2) Sensor kondisi cairan nutrisi

Sensor kondisi cairan nutrisi berfungsi untuk mengukur parameter fisik dan kimia dari larutan nutrisi atau air irigasi yang digunakan dalam budi daya tanaman di dalam *greenhouse*, khususnya sistem hidroponik, fertigasi, dan irigasi tetes. Parameter utama yang dipantau meliputi pH larutan, Electrical Conductivity (EC), suhu cairan nutrisi, dan Total Dissolved Solids (TDS). Parameter-parameter ini sangat berpengaruh terhadap ketersediaan unsur hara, penyerapan nutrisi oleh akar tanaman, dan kesehatan tanaman secara keseluruhan. Ketidaksesuaian nilai pH, EC, atau suhu larutan nutrisi dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi dan menurunkan efisiensi penyerapan hara, bahkan menimbulkan stres fisiologis pada tanaman.

Dalam sistem kontrol *greenhouse* modern, sensor kondisi cairan berperan sebagai input dalam pengendalian nutrisi berbasis umpan balik. D ata dari sensor tersebut digunakan untuk mengatur penambahan nutrisi, pengenceran larutan nutrisi, atau pengkondisian suhu air di dalam tandon secara otomatis. Pemantauan dan pengendalian pH serta EC secara berkelanjutan akan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi hingga 30% dan menjaga pertumbuhan tanaman menjadi lebih seragam dibandingkan sistem irigasi konvensional.

Jenis dan karakteristik dari sensor kondisi cairan nutrisi antara lain sebagai berikut.

a) Sensor EC

Sensor EC digunakan untuk mengukur konduktivitas listrik larutan yang berkorelasi langsung dengan konsentrasi ion nutrisi terlarut. Nilai EC dinyatakan dalam satuan mS/cm atau µS/cm. Pada budi daya hidroponik, nilai EC yang optimal umumnya berada pada kisaran 1,0–3,0 mS/cm, tergantung jenis tanaman dan fase pertumbuhan. Sensor EC banyak digunakan dalam sistem otomasi nutrisi untuk memastikan larutan tidak terlalu pekat atau terlalu encer. Studi menunjukkan bahwa pengendalian EC yang stabil dapat meningkatkan hasil tanaman sayuran daun hingga 25%.

b) Sensor pH

Sensor pH berfungsi mengukur tingkat keasaman atau kebasaan larutan nutrisi. Nilai pH memengaruhi kelarutan dan ketersediaan unsur hara, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Sebagian besar tanaman hortikultura tumbuh optimal pada pH 5,5–6,5. Sensor pH umumnya menggunakan elektroda gelas dengan *output* analog yang memerlukan kalibrasi berkala. Penelitian melaporkan bahwa penyimpangan pH di luar rentang optimal dapat menurunkan penyerapan nutrisi hingga 40%, sehingga pemantauan pH menjadi krusial dalam sistem *greenhouse*.

c) Sensor DS18B20

Sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu larutan nutrisi atau air irigasi. Suhu cairan berpengaruh terhadap aktivitas akar dan laju penyerapan nutrisi. Rentang suhu larutan yang ideal umumnya berada pada 18–25 °C. Sensor DS18B20 bersifat digital, memiliki akurasi tinggi (±0,5 °C), dan tersedia dalam versi *waterproof* sehingga cocok digunakan

pada lingkungan basah. Integrasi sensor suhu cairan dalam sistem kontrol *greenhouse* membantu mencegah stres akar akibat suhu larutan yang terlalu rendah atau terlalu tinggi.

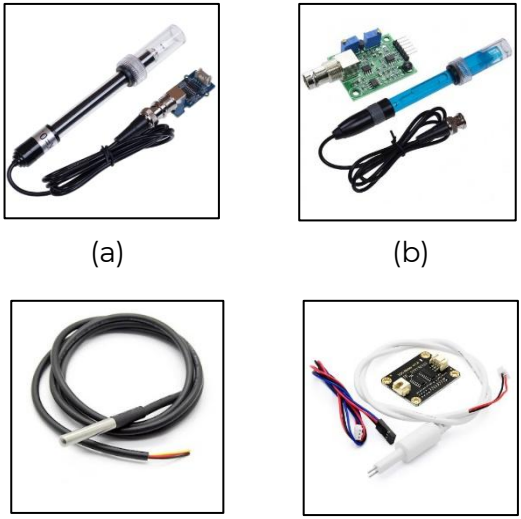
d) Sensor TDS

Sensor TDS digunakan untuk mengukur jumlah total zat padat terlarut dalam larutan nutrisi, biasanya dinyatakan dalam satuan PPM (*parts per million*). Nilai TDS sering digunakan sebagai indikator praktis konsentrasi nutrisi, terutama pada sistem hidroponik skala kecil. Sensor TDS bekerja berdasarkan prinsip konduktivitas listrik dan memiliki hubungan empiris dengan nilai EC. Penelitian menunjukkan bahwa pemantauan TDS secara rutin dapat membantu menjaga konsistensi nutrisi dan mengurangi resiko kelebihan larutan nutrisi yang dapat merusak akar dan pertumbuhan tanaman.

Tabel 3. Karakteristik teknis sensor cairan nutrisi

Sensor	Parameter	Rentang	Akurasi	Karakteristik
EC sensor	Konduktivitas larutan nutrisi	0–20 mS/cm	±2–5%	*Output analog/digital*, perlu kalibrasi
pH sensor	Keasaman larutan nutrisi	pH 0–14	±0,1–0,2 pH	Elektroda gelas, sensitif terhadap suhu udara
DS18B20 sensor	Suhu cairan nutrisi (perakaran)	−55–125 °C	±0,5 °C	Digital, *waterproof*
TDS sensor	Total zat terlarut dalam nutrisi	0–5000 ppm	±2–5%	Korelasi dengan EC

Contoh visualisasi dari beberapa sensor cairan nutrisi sebagaimana diberikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Sensor nutrisi: a) pendeteksi EC, b) pengukur pH, c) sensor DS18B20, dan d) sensor TDS

Sumber: aliexpress.com, 2025

Dalam sistem *greenhouse* modern, sensor EC, pH, suhu cairan nutrisi, dan TDS bekerja secara terintegrasi untuk membentuk sistem kontrol nutrisi tertutup. Data sensor akan dibandingkan dengan *set point* yang ditentukan berdasarkan kebutuhan tanaman, kemudian sistem mengaktifkan pompa nutrisi, katup pencampur, atau pompa peristaltik untuk mengoreksi kondisi larutan. Pendekatan integrasi akan meningkatkan stabilitas

nutrisi, efisiensi penggunaan nutrisi, dan peningkatan produktivitas tanaman di dalam *greenhouse*.

e) Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah perangkat komputer kecil yang dikemas dalam bentuk *chip* berupa IC (*Integrated Circuit*) yang berfungsi sebagai pengendali suatu sistem. Pada umumnya, suatu perangkat atau sistem yang menggunakan mikrokontroler sebagai pengolah data, dapat dibagi menjadi *embedded system* dan *dedicated system*.

Embedded system adalah suatu pengendali yang tertanam pada sistem atau perangkat, sedangkan *dedicated system* adalah pengendali suatu sistem yang dimaksudkan hanya untuk fungsi tertentu. Sebagai contoh, printer adalah suatu *embedded system* karena terdapat mikrokontroler di dalamnya sebagai pengendali dan juga *dedicated system* karena fungsi pengendali tersebut hanya untuk menerima data dan mencetaknya.

Mikrokontroler merupakan unit pengendali mikro yang mengintegrasikan prosesor, memori, dan periferal input/*output* (I/O) ke dalam satu *chip* tunggal. Mikrokontroler dirancang untuk melaksanakan tugas-tugas spesifik yang dapat diulang secara efisien dengan program yang tersimpan di dalam memori internal. Mikrokontroler berbeda dari mikroprosesor umum karena mereka memiliki sumber daya yang lebih terintegrasi dan sering kali dioptimalkan untuk aplikasi tertanam (*embedded*) yang membutuhkan operasi *realtime*. Beberapa mikrokontroler juga dilengkapi dengan fitur keamanan untuk melindungi data dan operasi sistem dari ancaman eksternal. Integrasi dan kemampuan untuk

penyesuaian dengan berbagai aplikasi membuat mikrokontroler menjadi komponen yang banyak digunakan dalam teknologi modern, mulai dari alat rumah tangga, sistem industri, perangkat medis, hingga bidang pertanian. Mikrokontroler memiliki beberapa fungsi, antara lain:

1) *Timer*: mengatur waktu dalam sistem.
2) Pembangkit osilasi: menghasilkan sinyal osilasi.
3) ADC (*Analog to Digital Converter*): mengonversi sinyal analog menjadi digital.
4) Penghitung: menghitung nilai dalam sistem.
5) *Decoder/Encoder*: mengubah data dari satu format ke format lain.

Berikut ini beberapa contoh mikrokontroler yang sering digunakan dalam sistem kontrol beserta fungsinya.

1) Arduino Uno

Arduino Uno adalah mikrokontroler yang sering digunakan untuk proyek-proyek DIY dan pendidikan. Fungsinya meliputi kontrol motor, sensor, LED, dan perangkat lainnya dalam sistem otomatisasi dan robotika.

2) Arduino ATmega 2560

Arduino ATmega 2560 adalah mikrokontroler yang digunakan dalam banyak papan Arduino. Fungsinya termasuk pengolahan data sensor, kontrol aktuator, dan aplikasi kontrol yang membutuhkan pemrosesan cepat dengan daya rendah.

3) ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang dilengkapi dengan Wi-Fi dan bluetooth. Ini sering digunakan dalam proyek IoT (Internet of Things) untuk menghubungkan perangkat ke jaringan internet dan mengontrolnya dari jarak jauh.

4) Raspberry Pi

Raspberry Pi adalah mikrokontroler berbasis chip RP2040 yang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan performa tinggi dengan konsumsi daya rendah, seperti sensor, aktuator, dan perangkat kontrol.

5) PIC16F877A

PIC16F877A adalah mikrokontroler bagian dari PIC yang banyak digunakan dalam industri untuk mengontrol mesin, peralatan otomatisasi, dan perangkat elektronik karena stabilitas dan kemampuannya yang andal.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Gambar 12. Mikrokontroler pada sistem kontrol, a) Arduino Uno, b) ATmega 2560, c) ESP 32, d) Raspberry Pi, dan e) PIC16F877A

Sumber: aliexpress.com, 2025

Beberapa perbandingan karakteristik dari komponen-komponen mikrokontroler di atas, diuraikan melalui Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Karakteristik mikrokontroler pada sistem kontrol di dalam *greenhouse*.

No	Mikrokontroler	*Processor/ Clock*	Memori Utama	I/O dan *interface*	Konektivitas	Keunggulan Utama
1	Arduino Uno	ATmega328P / 16 MHz	Flash 32 KB, SRAM 2 KB	14 Digital I/O, 6 Analog, UART, I²C, SPI	–	Mudah diprogram, sangat stabil, cocok edukasi
2	Arduino ATmega 2560	ATmega2560 / 16 MHz	Flash 256 KB, SRAM 8 KB	54 Digital I/O, 16 Analog, UART, I²C, SPI	–	I/O banyak, cocok untuk sistem besar
3	ESP32	Dual-core Xtensa / hingga 240 MHz	Flash eksternal, SRAM ±520 KB	34 GPIO, ADC, DAC, UART, I²C, SPI, PWM	Wi-Fi dan *Bluetooth*	IoT-*ready*, cepat, hemat daya
4	Raspberry Pi Pico (RP2040)	Dual-core ARM Cortex-M0+ / 133 MHz	SRAM 264 KB	26 GPIO, ADC, UART, I²C, SPI, PWM	Wi-Fi dan *Bluetooth*	Performa tinggi, *timing* presisi, IoT-*ready*
5	PIC16F877A	PIC 8-bit / 20 MHz	Flash 14 KB, RAM 368 B	33 I/O, ADC, UART, SPI, I²C	Wi-Fi dan *Bluetooth*	Andal, *industrial grade,* IoT-*ready*

Secara ringkas dapat dikatakan bahwa Arduino Uno cocok sebagai mikrokontroler pertama untuk memahami konsep dasar sistem kontrol, sensor, dan aktuator. Arduino ATmega 2560 digunakan ketika sistem membutuhkan banyak input–*output*, misalnya *greenhouse* dengan banyak sensor dan aktuator. ESP32 sangat ideal untuk *greenhouse* berbasis IoT karena mampu mengirim data sensor ke *cloud* dan menerima perintah jarak jauh. Raspberry Pi (RP2040) unggul dalam pengolahan data cepat dan presisi *timing*, cocok untuk eksperimen kontrol lanjutan dan data *acquisition*. PIC16F877A banyak digunakan di industri karena stabil dan tahan gangguan, meskipun pemrogramannya lebih teknis.

f) Aktuator

Aktuator adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi listrik, hidrolik, pneumatik, atau mekanik menjadi gerakan atau tindakan fisik dalam sebuah sistem. Aktuator mengambil sinyal dari perangkat kontrol atau pengendali dan menggunakannya untuk menghasilkan gerakan atau tindakan yang diinginkan. Aktuator merupakan bagian penting dari sistem otomatisasi dan kontrol yang digunakan dalam berbagai aplikasi di *greenhouse*. Adapun fungsi utama aktuator antara lain:

1) Penggerak mekanis

Aktuator mengubah energi yang diterima menjadi gerakan mekanis, seperti rotasi atau translasi, untuk melakukan tugas tertentu dalam sistem.

2) Pengaturan dan pengendalian

Aktuator digunakan untuk mengatur atau mengontrol berbagai komponen atau perangkat dalam sistem, seperti katup, pintu, atau mekanisme lainnya.

3) Respon terhadap sistem kontrol

Aktuator bertindak sebagai pelaksana tindakan fisik yang diinstruksikan oleh sinyal yang diterima dari perangkat kontrol atau pengendali.

Adapun jenis-jenis aktuator:

1) Aktuator listrik

Mengubah energi listrik menjadi gerakan mekanis, seperti motor listrik yang menggerakkan mesin atau perangkat lainnya.

2) Aktuator hidrolik

Menggunakan energi hidrolik untuk menghasilkan gerakan, seperti silinder hidrolik yang digunakan dalam sistem pengangkatan atau penekanan.

3) Aktuator pneumatik

Menggunakan udara bertekanan untuk menghasilkan gerakan, seperti silinder pneumatik yang digunakan dalam sistem otomatisasi industri.

4) Aktuator elektro-mekanik

Kombinasi dari elemen-elemen listrik dan mekanis untuk menghasilkan gerakan, seperti solenoid yang mengubah energi listrik menjadi gerakan mekanis. Gambar 11 berikut ini menunjukkan berbagai aktuator pada sistem kontrol.

(a) (b) (c) (d)

Gambar 83. Aktuator pada sistem kontrol: a) kipas, b) pompa nutrisi, c) *humidifier*, dan d) *peltier*

Sumber: aliexpress.com, 2025

g) Model

Model adalah representasi matematis atau fisik dari sistem yang sedang dikendalikan. Model digunakan untuk memahami perilaku sistem dan merencanakan strategi kontrol yang efektif. Model sistem dapat berupa model matematika yang rumit atau model fisik yang sederhana, tergantung pada kompleksitas sistem dan kebutuhan kontrol. Model dapat membantu untuk memprediksi bagaimana sistem akan merespons terhadap perubahan input atau kondisi tertentu, sehingga memungkinkan pengembangan strategi kontrol yang tepat. Dalam sistem kontrol nutrisi, model bisa mencakup persamaan matematika yang menjelaskan hubungan antara pH, kelembapan tanah, EC, TDS, dan unsur-unsur nutrisi lainnya. Berikut ini contoh model yang sering digunakan dalam sistem kontrol.

1) Model Linier Time-Invariant (LTI)
2) Model *fuzzy*
3) Model persamaan diferensial, contohnya Proporsional-Integral-Derivatif (PID)

4) Model neural *network*, contohnya model ANN
5) Model transfer *function*

2. Keuntungan penggunaan sistem kontrol

a. Optimasi pertumbuhan tanaman

Sistem kontrol lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan cahaya pada *greenhouse* memungkinkan pertumbuhan tanaman yang lebih optimal dengan hasil yang lebih baik.

b. Efisiensi energi

Sistem kontrol dapat mengoptimalkan penggunaan energi dengan mengatur perangkat kontrol, seperti *exhaust fan*, *sprayer*, fertigasi, dan lain-lain sesuai dengan kebutuhan.

c. Pemantauan jarak jauh

Sistem kontrol dapat dilengkapi dengan kemampuan pemantauan jarak jauh yang memungkinkan operator untuk memantau dan mengontrol lingkungan *greenhouse* bahkan saat tidak berada di lokasi.

d. Meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil tanaman

Sistem kontrol dapat membantu mengurangi risiko kerugian tanaman akibat kondisi ekstrem atau penyakit, sekaligus meningkatkan kualitas hasil panen. Prinsip kerja sistem kontrol, yaitu input (sensor), proses (mikrokontroler), dan *output* (aktuator).

Rangkuman

1. Sistem kontrol pada *greenhouse* merupakan serangkaian perangkat yang saling terintegrasi untuk memantau dan mengontrol lingkungan di dalam *greenhouse* dengan tujuan menciptakan lingkungan kondisi tumbuh yang optimal bagi tanaman.

2. Keuntungan sistem kontrol, yaitu optimasi pertumbuhan tanaman, efisiensi energi, pemantauan jarak jauh, serta meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil tanaman budi daya.
3. Prinsip kerja sistem kontrol, yaitu input (sensor)–proses (mikrokontroler)–*output* (aktuator).
4. Komponen sistem kontrol, yaitu sensor, mikrokontroler, dan aktuator.
5. Konsep dasar sistem kontrol, yaitu *set point*, rentang, dan model.

C. Sistem Kontrol Irigasi dan Fertigasi di dalam *Greenhouse*

Irigasi adalah proses penyediaan air untuk tanaman agar tetap hidup dan tumbuh dengan baik. Proses ini dilakukan dengan menggunakan sistem saluran air, pipa, pompa, dan teknologi lainnya untuk mengalirkan air ke lahan pertanian. Irigasi sangat penting di daerah yang kurang hujan atau memiliki musim kemarau yang panjang, yaitu daerah yang air tanah atau air hujan tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan tanaman. Irigasi dapat meningkatkan produksi tanaman, menjaga kualitas tanah, dan memastikan ketahanan pangan (Ingrao *et al.,* 2023; Scherer *et al.,* 2022).

Fertigasi adalah teknik penggunaan pupuk dan nutrisi lainnya yang dilarutkan dalam air irigasi dan diberikan langsung pada tanaman melalui sistem irigasi. Penggunaan sistem fertigasi memungkinkan nutrisi esensial dapat disalurkan langsung ke akar tanaman, sehingga penyerapan nutrisi lebih efisien. Hal ini memungkinkan petani untuk mengontrol persediaan nutrisi tanaman dengan lebih tepat, sehingga

meningkatkan kualitas dan hasil panen, serta mengurangi pemborosan nutrisi (Ranjan dan Sow, 2021; Dixon dan Liu, 2022; Sun *et al.,* 2023; Kumar *et al.,* 2025). Gambar 14 menunjukkan sistem irigasi dan fertigasi yang ada di pertanian.

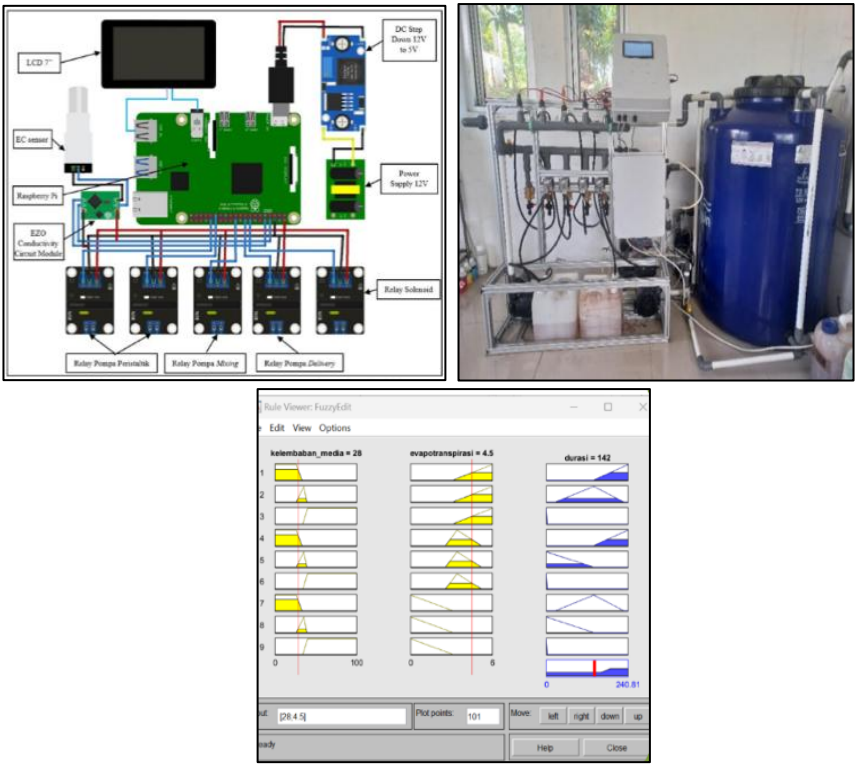
Gambar 9. Sistem irigasi dan fertigasi pada pertanian
Sumber: kompasiana.com, 2025

Sistem kontrol irigasi dan fertigasi adalah teknologi yang digunakan untuk mengatur dan mengoptimalkan penyiraman tanaman serta pemberian nutrisi dalam pertanian modern.

Melalui penggunaan sistem fertigasi ini, petani dapat mengontrol jumlah air dan nutrisi yang diberikan kepada tanaman secara otomatis, sehingga meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan sumber daya serta energi (Dixon dan Liu, 2022). Keuntungan penggunaan sistem kontrol pada irigasi dan fertigasi sebagai berikut.

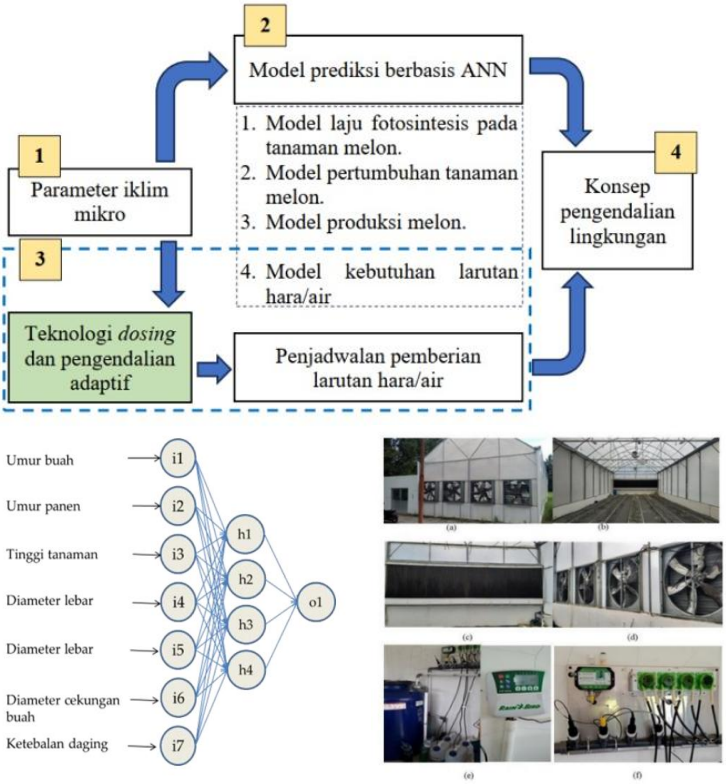
1. Peningkatan produktivitas
   Penggunaan sistem kontrol penyiraman dan pemberian nutrisi dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil panen tanaman.
2. Penghematan sumber daya
   Sistem kontrol ini membantu efisiensi penggunaan air dan nutrisi dengan memberikan jumlah yang tepat sesuai kebutuhan tanaman.
3. Otomatisasi
   Otomatisasi proses penyiraman dan pemberian nutrisi mengurangi beban kerja petani dan memungkinkan mereka untuk fokus pada aspek lain dari pertanian.

Sistem kontrol irigasi dan fertigasi adalah teknologi yang digunakan untuk mengatur dan mengoptimalkan penyiraman tanaman serta pemberian nutrisi dalam pertanian modern. Melalui penggunaan sistem kontrol ini, petani dapat mengontrol jumlah air dan nutrisi yang diberikan kepada tanaman secara otomatis, sehingga meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan sumber daya serta energi. Contoh sistem kontrol fertigasi yang diterapkan pada *greenhouse* seperti yang disajikan pada Gambar 15 dan 16 di bawah ini.



Gambar 10. Sistem kontrol fertigasi dengan logika *Fuzzy* untuk tanaman hidroponik dengan sistem irigasi tetes

Sumber: Prastono, 2023



Gambar 11. Model jaringan saraf tiruan untuk pengendalian lingkungan budi daya tanaman melon secara hidroponik di dalam *greenhouse*

Sumber: Erniati, 2023

1. Sistem kontrol waktu

Timer berfungsi untuk mengontrol aliran air melalui sistem irigasi atau sistem penyiraman. Pemrograman *timer* digunakan untuk mengatur jadwal penyiraman sesuai kebutuhan tanaman. *Timer* biasanya terhubung langsung ke sumber air dan katup irigasi, sehingga dapat mengaktifkan dan

mematikan aliran air secara otomatis. Setelah *timer* diprogram, *timer* akan secara otomatis mengaktifkan dan mematikan aliran air sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan, bahkan jika pengguna tidak berada di lokasi. Pengaturan pewaktu sesuai dengan spesifikasi, dapat diatur tiap jam, dapat juga diatur tiap menit dengan lebih dari 20 pengaturan waktu.

2. Sistem kontrol waktu dengan *timer* digital

Programmable timer digital merupakan alat listrik sederhana dalam bentuk stop kontak fleksibel yang dapat digunakan untuk otomatisasi operasional (ON/OFF) berbagai macam peralatan listrik termasuk pompa pada irigasi sesuai dengan waktu yang dikehendaki. *Programmable digital timer* memiliki kemampuan otomatisasi 20x *timer* ON dan 20x *timer* OFF untuk waktu harian hingga mingguan dan dapat diulang setiap minggunya. *Timer* ini memiliki presisi waktu hingga satu menit dan kemampuan beban daya maksimal hingga 3.500 watt.

Gambar 12. *Timer* Digital
Sumber: sinarlistrik.com, 2025

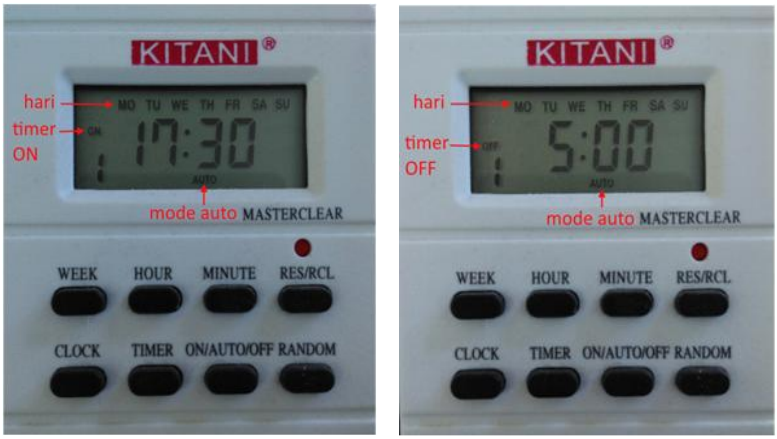
Contoh sistem kontrol waktu untuk penjadwalan fertigasi:

a. Terdapat dua tahapan/kategori pengaturan, yaitu pengaturan waktu (*clock*) dan pengaturan otomatisasi ON dan OFF (*timer*), yang masing-masing memerlukan pengaturan hari, jam, dan menit.

b. Pengaturan waktu (*clock*)
   1) *Setting* hari pertama dimulainya pemakaian. Tekan tombol "CLOCK" jangan dilepas dan diikuti dengan menekan tombol "WEEK" beberapa kali hingga *display* hari (MO, TU, WE, TH, FR, SA, atau SU) telah sesuai dengan hari pertama akan dimulainya pemakaian.
   2) Pengaturan waktu. Tekan tombol "CLOCK" jangan dilepas dan diikuti dengan menekan tombol "HOUR" untuk mengatur jam atau tekan beberapa kali tombol "MINUTE" untuk mengatur menit hingga sesuai dengan waktu pertama akan dimulainya pemakaian.

c. Pengaturan otomatisasi *timer* (PROG)
   1) Pengaturan hari: untuk *setting* hari silakan tekan tombol "PROG" kemudian tekan tombol "WEEK" beberapa kali hingga *display* hari (MO, TU, WE, TH, FR, SA, atau SU) telah sesuai dengan yang dikehendaki. Pilihan hari bisa lebih dari satu (berulang).
   2) Pengaturan waktu *timer*: untuk pengaturan waktu *timer* maka tekan tombol "PROG" beberapa kali dan amati perubahan tampilan (*display*). Angka 1 dan seterusnya adalah nomor urutan program *timer*-nya, *display* ON artinya pengaturan *timer* untuk ON, dan *display* OFF artinya pengaturan *timer* untuk OFF.
   3) Pengaturan jam dan menit *timer*: untuk pengaturan jam tekan beberapa kali tombol "HOUR" untuk mengatur jam

dan tekan beberapa kali tombol “MINUTE” untuk mengatur menit hingga sesuai dengan yang dikehendaki.



(a) (b)

Gambar 13. Tampilan *timer* untuk pengaturan setiap hari, a) “ON” setiap hari pada jam 17:30 dan b) “OFF” pada jam 05.00

Sumber: mitratek.com, 2025

d. Setelah semua pengaturan telah selesai, tahap berikutnya adalah memilih mode operasional manual ON atau OFF, mode AUTO atau mode random. Tekan tombol ON/AUTO/OFF beberapa kali untuk memilih mode yang ingin diaktifkan.
e. Tekan tombol “R/RECALL” untuk reset program saat ini.
f. Tekan tombol kecil “R” untuk reset semua program yang ada.

Gambar 14. Sistem fertigasi melon pada smart *greenhouse* Polbangtan Bogor

Sumber: Polbangtan Bogor, 2025

Rangkuman

1. Irigasi adalah proses penyediaan air bagi tanaman untuk memastikan pertumbuhannya optimal, terutama di daerah dengan curah hujan yang rendah atau musim kemarau yang panjang. Irigasi membantu dalam menjaga produksi tanaman, kualitas tanah, dan ketahanan pangan.

2. Fertigasi adalah teknik penggabungan irigasi dengan pemberian nutrisi, di mana pupuk dilarutkan dalam air dan dialirkan langsung ke akar tanaman melalui sistem irigasi. Fertigasi meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi, kualitas panen, dan mengurangi pemborosan nutrisi.
3. Sistem kontrol irigasi dan fertigasi adalah teknologi yang memungkinkan pengaturan otomatis jumlah air dan nutrisi yang diberikan kepada tanaman, sehingga meningkatkan produktivitas dan efisiensi penggunaan sumber daya serta energi. Keuntungan utama dari sistem ini meliputi peningkatan produktivitas, penghematan sumber daya, dan otomatisasi proses.
4. Sistem kontrol waktu dalam irigasi menggunakan *timer* untuk mengatur jadwal penyiraman sesuai dengan kebutuhan tanaman. *Timer* ini mengatur aliran air secara otomatis berdasarkan waktu yang telah diprogram, sehingga penyiraman dapat berlangsung tanpa memerlukan kehadiran fisik pengguna.

D. Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Udara dalam *Greenhouse*

Sistem kontrol suhu dan kelembapan udara di dalam *greenhouse* adalah teknologi yang dirancang untuk mengatur dan mempertahankan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan tanaman. Suhu dan kelembapan udara adalah dua faktor penting yang memengaruhi kesehatan dan produktivitas tanaman.

Parameter lingkungan di dalam *greenhouse* yang berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman, yaitu cahaya

matahari, suhu udara, kelembapan udara, pasokan nutrisi, kecepatan angin, dan konsentrasi karbon dioksida (Suhardiyanto, 2023). Parameter mikroklimat tersebut dapat dikendalikan dengan sistem kontrol (Laumal, 2023). Sistem kontrol secara umum dapat dibedakan menjadi tiga input, yaitu *set point*, rentang (*range*), dan model.

1. Kontrol suhu

Suhu yang tepat dalam *greenhouse* sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat memengaruhi proses fotosintesis, metabolisme, dan perkembangan tanaman. Sistem kontrol suhu biasanya melibatkan penggunaan sensor suhu untuk memantau kondisi lingkungan dan *actuator*, seperti kipas, pemanas, atau pendingin untuk menyesuaikan suhu dengan kebutuhan tanaman. Prinsip kerja sistem kontrol suhu adalah dengan menjaga suhu pada rentang yang telah ditentukan atau *set point* dengan mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat kontrol berdasarkan data dari sensor.

2. Kontrol kelembapan udara

Kelembapan udara memainkan peran kunci dalam kesehatan tanaman. Kelembapan yang rendah menyebabkan kekeringan dan stres pada tanaman, sedangkan kelembapan yang tinggi dapat memicu pertumbuhan jamur dan penyakit. Sistem kontrol kelembapan udara menggunakan sensor sebagai pengukur tingkat kelembapan dan aktuator seperti *sprayer* atau *dehumidifier* untuk menyesuaikan kelembapan. Sistem ini bekerja dengan mengatur jumlah air yang disemprotkan atau dihilangkan dari lingkungan untuk menjaga kelembapan dalam rentang yang optimal.

Keuntungan penggunaan sistem kontrol suhu dan kelembapan udara:

1. Pengaturan lingkungan yang optimal

Tanaman dapat tumbuh dalam kondisi ideal, serta meningkatkan kesehatan dan hasil panen dengan sistem kontrol suhu dan kelembapan yang tepat.

2. Efisiensi energi

Sistem ini dapat mengoptimalkan penggunaan energi dengan mengaktifkan perangkat kontrol ketika diperlukan, sehingga dapat mengurangi pemborosan energi.

3. Pengurangan risiko penyakit

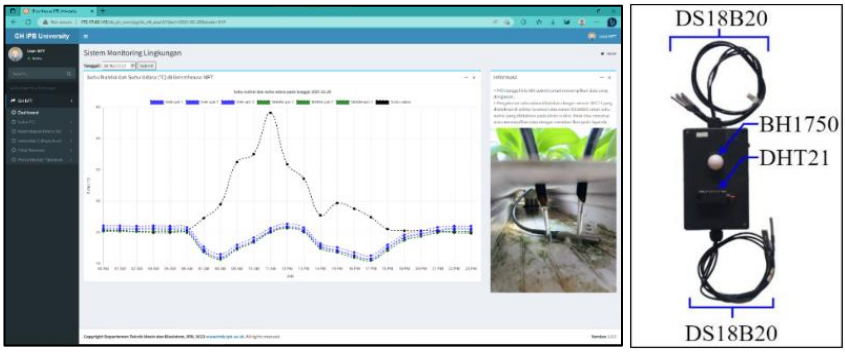
Pengaturan kelembapan yang baik dapat mencegah pertumbuhan jamur dan penyakit tanaman, serta meningkatkan kualitas tanaman.

4. Otomatisasi

Sistem kontrol otomatis mengurangi kebutuhan akan intervensi manual, memungkinkan petani fokus pada aspek lain dari budi daya tanaman.

Gambar 15. Sistem kontrol adaptif untuk rumah tanaman di kawasan beriklim tropika dengan model jaringan syaraf tiruan

Sumber: Laumal, 2023



Gambar 216. Sistem monitoring *greenhouse* berbasis *Internet of Things*
Sumber: Firmansyah, 2023

Contoh sistem kontrol suhu dan kelembapan udara sederhana:
Bahan:

1. Arduino UNO
2. Sensor DHT21
3. Kipas 12V
4. *Relay* 2 *channel*
5. LCD *display with* I2C
6. Kabel *jumper*
7. *Breadboard* mini
8. Adaptor 12V
9. *Jack* DC adaptor

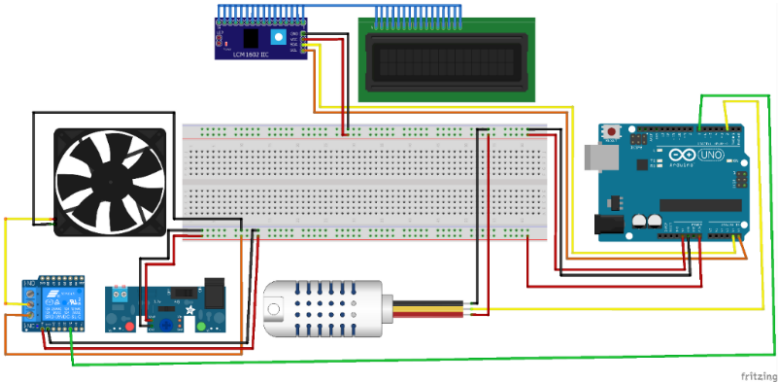
Alat:

1. Laptop
2. Kabel *uploader*
3. Multimeter
4. Obeng set
5. Gunting
6. Stop kontak

Prosedur kerja:

1. Lakukan pembuatan rangkaian sistem kontrol dengan langkah-langkah sebagai berikut.
   a. Siapkan alat dan bahan.
   b. Sambungkan sensor DHT 21 pada pin 2 Arduino UNO.
   c. Sambungkan LCD pada pin Arduino UNO.

d. Sambungkan *relay* pada pin 7 Arduino UNO.
e. Sambungkan kipas 12V pada sumber tegangan dan *relay*.



Gambar 17. Rangkaian sistem kontrol suhu dan kelembapan udara
Sumber: Polbangtan Bogor, 2025

2. *Upload* kode program sebagai berikut:

```
#include <DHT.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#define DHTPIN 2      // Pin sensor DHT terhubung ke
pin 2 Arduino
#define DHTTYPE DHT21 // Tipe sensor DHT (DHT21 atau
DHT22)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
float temperature;
float humidity;
const int relay1Pin = 7;
// Inisialisasi objek LiquidCrystal_I2C:
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);  // Alamat I2C
0x27, LCD 16x2
void setup() {
```

```
  // Inisialisasi sensor DHT
  dht.begin();
  // Inisialisasi LCD 16x2 dengan alamat I2C
  lcd.begin();
  lcd.backlight();  // Aktifkan backlight LCD
  // Inisialisasi pin relay sebagai output
  pinMode(relay1Pin, OUTPUT);
  digitalWrite(relay1Pin, LOW);
}
void loop() {
  // Membaca kelembapan dan suhu dari sensor DHT
  float temperature = dht.readTemperature();
  float humidity = dht.readHumidity();
  // Menampilkan kelembapan dan suhu pada LCD
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Temp : ");
  lcd.print(temperature);
  lcd.print(" C");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("RH   : ");
  lcd.print(humidity);
  lcd.print(" %");
  // Mengatur kipas berdasarkan suhu
  if (temperature > 28) {
    digitalWrite(relay1Pin, HIGH); // Nyalakan relay
  } else {
    digitalWrite(relay1Pin, LOW); // Matikan relay
  }
  delay(2000); // Delay 2 detik sebelum membaca ulang
sensor
}
```

3. Berikan perlakuan suhu hingga *relay* bekerja sesuai dengan logika sistem kontrol.
4. Lakukan modifikasi suhu untuk kontrol *set point* pada kode program berikut ini.

```
if (temperature > 28)
```

Rangkuman

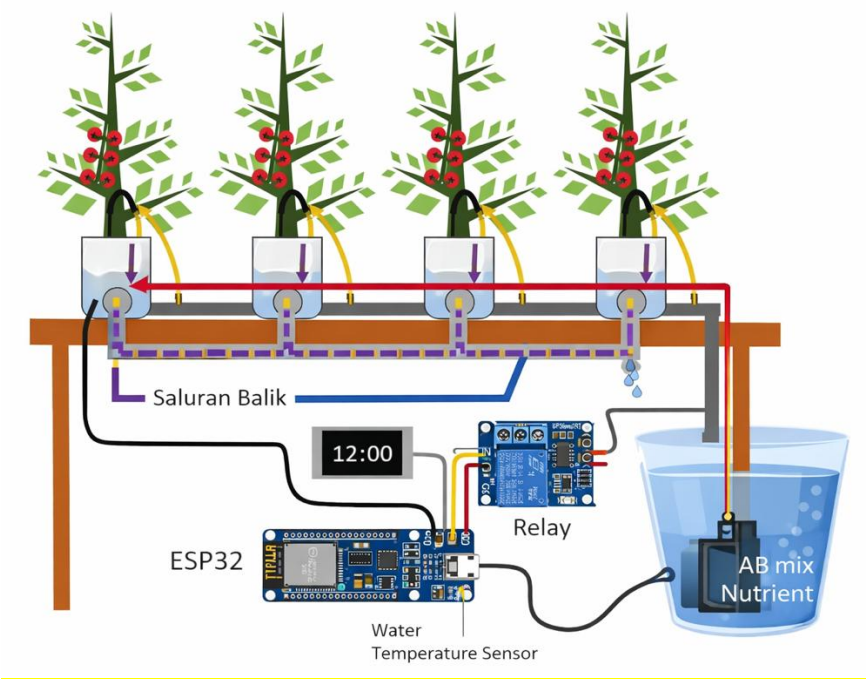
1. Sistem kontrol suhu dan kelembapan udara dalam *greenhouse* bertujuan untuk mempertahankan kondisi lingkungan yang optimal untuk pertumbuhan tanaman.
2. Kontrol suhu melibatkan penggunaan sensor suhu dan aktuator seperti kipas atau pemanas untuk menjaga suhu pada rentang yang diinginkan.
3. Kontrol kelembapan udara melibatkan penggunaan sensor kelembapan dan aktuator seperti *sprayer* atau *dehumidifier* untuk mengatur kelembapan udara.
4. Keuntungan sistem kontrol meliputi pengaturan lingkungan yang optimal, efisiensi energi, pengurangan risiko penyakit, dan otomatisasi.

E. Sistem Kontrol Irigasi *Drip* Otomatis

Sistem kontrol irigasi *drip* otomatis merupakan contoh sistem kontrol ON–OFF berbasis waktu (*time-based open-loop control*) yang digunakan untuk mengatur pemberian nutrisi AB mix pada sistem *drip* hidroponik di dalam *greenhouse*. Nutrisi disimpan dalam sebuah wadah, kemudian didistribusikan ke tanaman menggunakan pompa air melalui selang *drip*.

Pengendalian pompa dilakukan oleh mikrokontroler ESP32 berdasarkan jadwal waktu tetap yang telah diprogram dan dimasukkan ke dalam mikrokontroler, yaitu pompa akan ON setiap pagi pukul 08.00 dan sore pukul 16.00, selama 15 menit untuk mengalirkan nutrisi ke tanaman.

Skema sistem tersebut sebagaimana diberikan melalui Gambar 23.



Gambar 23. Skema sistem kontrol irigasi *drip* otomatis

Sumber: Polbangtan Bogor, 2025

Komponen-komponen dari sistem kontrol *drip irrigation* sebagaimana Gambar 23, diuraikan sebagai berikut.

1. Wadah nutrisi AB mix, yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan larutan nutrisi AB mix yang telah dicampur sesuai kebutuhan tanaman. Volume wadah disesuaikan dengan jumlah tanaman dan frekuensi pemberian nutrisi.
2. Pompa air AC, yaitu pompa air bertegangan listrik bolak-balik (AC) yang memanfaatkan sumber listrik dari PLN. Pompa air ini digunakan untuk mengalirkan larutan nutrisi dari wadah ke jaringan selang *drip*. Pompa ini bekerja dalam mode ON–OFF yang aktif hanya saat jadwal pemberian nutrisi berlangsung.
3. Selang *drip* dan *emitter*, yang berfungsi untuk mendistribusikan nutrisi langsung ke zona akar tanaman secara merata dan efisien, sehingga mengurangi pemborosan air dan nutrisi.
4. *Relay*, yaitu sebuah modul yang digunakan sebagai aktuator elektronik yang menghubungkan sinyal logika rendah dari ESP32 ke beban berdaya tinggi (pompa). *Relay* memungkinkan ESP32 untuk menghidupkan atau mematikan pompa secara otomatis dan aman.
5. Mikrokontroler ESP32, berperan sebagai unit pengendali utama (*controller*), yang bertugas untuk menyimpan jadwal

waktu pemberian nutrisi, mengaktifkan *relay* pada waktu yang ditentukan, dan mengendalikan durasi kerja pompa. ESP32 dipilih karena memiliki RTC internal berbasis *software*, kemampuan IoT (jika dikembangkan lebih lanjut), dan konsumsi daya yang rendah.

6. Catu daya, yang berfungsi untuk menyediakan tegangan untuk ESP32 dan pompa. ESP32 biasanya menggunakan daya 5 volt untuk mengaktifkan modulnya, sedangkan sumber daya dari PLN juga perlu digunakan untuk memberikan aliran listrik ke pompa.

Sistem kontrol *drip* irigasi bekerja berdasarkan kontrol ON–OFF dengan *timer*, tanpa umpan balik sensor (*open-loop*). Prinsip dan alur kerja dari sistem ini sebagai berikut.

1. Proses inisialisasi sistem, yaitu ketika sistem dinyalakan, mikrokontroler ESP32 akan melakukan inisialisasi waktu dan mengatur jadwal pemberian nutrisi pada pukul 08.00 dan 16.00.
2. Monitoring waktu, yaitu mikrokontroler ESP32 secara terus-menerus akan membaca waktu sistem (modul RTC pada ESP32).
3. Aktivasi pompa (ON), yaitu ketika waktu menunjukkan pukul 08.00 atau 16.00, maka: ESP32 mengirimkan sinyal

logika HIGH ke *relay*, *relay* aktif dan menghubungkan sumber daya listrik ke pompa. Pompa akan menyala dan mendistribusikan nutrisi ke tanaman melalui sistem *drip*.

4. Durasi pemberian nutrisi, yaitu pompa akan bekerja selama waktu tertentu (15 menit) yang telah ditentukan di dalam koding program mikrokontroler ESP32.
5. Pemadaman pompa (OFF)
6. Setelah durasi 15 menit tercapai, maka ESP32 akan mematikan *relay*. Pompa akan berhenti bekerja dan sistem kembali ke mode menunggu jadwal berikutnya. Proses ini berulang setiap hari secara otomatis tanpa intervensi manual dari manusia (*user*).

Simulasi koding program untuk sistem kontrol irigasi *drip* adalah sebagai berikut.

```
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

/* ========================
   KONFIGURASI PIN ESP32
   ======================== */
#define RELAY_PIN 26
#define ONE_WIRE_BUS 4
```

```
/* ========================
   INISIALISASI SISTEM
   ======================== */
RTC_DS3231 rtc;
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

/* ========================
   PARAMETER SISTEM
   ======================== */
const int irrigationDuration = 300;   //
durasi pompa ON (detik) = 5 menit
bool irrigationActive = false;
unsigned long irrigationStartTime;

/* ========================
   SETUP
   ======================== */
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);   // Pompa OFF

  sensors.begin();

  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println("RTC tidak terdeteksi!");
    while (1);
  }

  if (rtc.lostPower()) {
```

```
    Serial.println("RTC kehilangan daya, set
waktu ulang!");
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__),
F(__TIME__)));
  }

  Serial.println("Sistem Kontrol Irigasi Drip
ESP32 Siap");
}

/* ========================
   PROGRAM UTAMA
   ======================== */
void loop() {
  DateTime now = rtc.now();

  // Tampilkan waktu
  Serial.print("Waktu: ");
  Serial.print(now.hour());
  Serial.print(":");
  Serial.print(now.minute());
  Serial.print(":");
  Serial.println(now.second());

  // Baca suhu air
  sensors.requestTemperatures();
  float waterTemp =
sensors.getTempCByIndex(0);
  Serial.print("Suhu Air: ");
  Serial.print(waterTemp);
  Serial.println(" °C");

  /* ========================
```

```
     LOGIKA KONTROL IRIGASI
     ======================= */

  // Jadwal irigasi pagi & sore
  if (!irrigationActive &&
      ((now.hour() == 8 && now.minute() == 0)
||
       (now.hour() == 16 && now.minute() ==
0))) {

    Serial.println("Irigasi DIMULAI");
    digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);   // Pompa
ON
    irrigationActive = true;
    irrigationStartTime = millis();
  }

  // Matikan pompa setelah durasi tercapai
  if (irrigationActive &&
      millis() - irrigationStartTime >=
irrigationDuration * 1000UL) {

    digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);   // Pompa
OFF
    irrigationActive = false;
    Serial.println("Irigasi SELESAI");
  }

  Serial.println("-------------------------");
  delay(1000);
}
```

Beberapa catatan penting dari sistem kontrol irigasi *drip* diberikan melalui Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik sistem kontrol irigasi *drip* di dalam *greenhouse*

Aspek	Keterangan
Jenis kontrol	ON–OFF berbasis waktu
Tipe sistem	*Open-loop* (tanpa sensor umpan balik)
Variabel dikontrol	Waktu dan durasi pemberian nutrisi
Aktuator	Pompa air
Kontroler	ESP32
Kompleksitas	Rendah

Sistem kontrol irigasi *drip* hidroponik ini menerapkan metode kontrol ON–OFF berbasis waktu dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama. Aktivasi pompa nutrisi dilakukan secara otomatis berdasarkan jadwal yang ditetapkan melalui modul Real Time Clock (RTC). Sementara sensor suhu air digunakan sebagai sistem monitoring untuk memantau kondisi zona perakaran tanaman. Sistem ini diklasifikasikan sebagai sistem kontrol terbuka (*open-loop*) karena proses pengambilan keputusan tidak didasarkan pada umpan balik sensor. Meskipun sederhana, sistem kontrol pemberian nutrisi AB mix berbasis ESP32 ini terbukti efektif dan mudah diimplementasikan pada sistem *drip* hidroponik, serta mampu meningkatkan konsistensi pemberian nutrisi dan efisiensi operasional dibandingkan pengendalian manual.

BAB 4

PERAWATAN DAN REHABILITASI *GREENHOUSE*

A. Perawatan *Greenhouse*

Perawatan *greenhouse* adalah serangkaian tindakan yang dilakukan untuk memastikan bahwa *greenhouse* tetap berfungsi secara optimal dan tanaman di dalamnya dapat tumbuh dengan baik. Perawatan ini mencakup pemeriksaan rutin, pembersihan, dan pemeliharaan berbagai komponen *greenhouse*, seperti struktur, sistem irigasi, ventilasi, dan pencahayaan (Ditjen Hortikultura, 2021).

Perawatan yang baik akan memastikan bahwa *greenhouse* dapat berfungsi secara optimal dan tanaman di dalamnya dapat tumbuh dengan sehat. Perawatan rutin juga dapat mencegah kerusakan besar yang memerlukan biaya perbaikan tinggi, meningkatkan efisiensi operasional, dan memastikan produktivitas yang maksimal (Ditjen Hortikultura, 2021). Komponen utama perawatan *greenhouse* sebagai berikut.

1. Pemeriksaan struktur
   a. Rangka dan penutup yang berfungsi sebagai pelindung utama tanaman dari pengaruh lingkungan luar dipastikan kokoh dan penutup plastik atau kaca tidak rusak atau bocor. Rangka *greenhouse*, harus diperiksa secara berkala untuk memastikan kekuatan, kestabilan, dan ketahanannya terhadap beban angin serta hujan. Sedangkan penutup *greenhouse* juga perlu diperiksa

dari kemungkinan sobekan, retakan, atau kebocoran yang dapat mengganggu pengaturan suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya di dalam *greenhouse*.

b. Fungsi pintu dan jendela juga harus dipastikan berjalan dengan baik agar sistem ventilasi dapat bekerja secara optimal dalam menjaga sirkulasi udara

2. Sistem irigasi
   a. Pemeriksaan saluran air, pipa, *emitter*, dan *nozzle* untuk memastikan tidak terjadi penyumbatan, kebocoran, atau penurunan tekanan air. Adanya kondisi yang tidak normal tersebut dapat memengaruhi ketidakseragaman air irigasi sehingga pertumbuhan tanaman tidak seragam.
   b. Kualitas air irigasi juga perlu diperhatikan dengan melakukan pengecekan pH dan kandungan nutrisi agar sesuai dengan kebutuhan tanaman dan tidak menimbulkan gangguan pertumbuhan. Sistem irigasi yang terawat dengan baik akan meningkatkan efisiensi penggunaan air, menjaga keseragaman pemberian nutrisi, dan mencegah stres tanaman akibat kekurangan atau kelebihan air.
3. Ventilasi dan pengatur suhu
   a. Kipas dan ventilator: memastikan kipas dan ventilator berfungsi dengan baik.
   b. Sensor suhu dan kelembapan: memeriksa keakuratan sensor dan memastikan pengatur suhu otomatis berfungsi dengan baik.
4. Pencahayaan
   a. Lampu tanaman (*grow lights*): memastikan intensitas dan spektrum cahaya yang dihasilkan masih sesuai dengan kebutuhan tanaman. Lampu yang mati atau mengalami

penurunan kinerja harus segera diganti agar proses fotosintesis tidak terganggu

b. Cahaya alami: memastikan *greenhouse* mendapatkan cukup cahaya alami tanpa ada penghalang.

5. Pembersihan dan sanitasi
   a. Lantai dan dinding: membersihkan lantai dan dinding secara rutin dari kotoran, lumut, dan sisa-sisa tanaman yang dapat menjadi sumber patogen
   b. Peralatan: mensterilkan alat-alat yang digunakan dalam *greenhouse* untuk mencegah penyebaran penyakit.
6. Pengendalian hama dan penyakit
   a. Inspeksi tanaman: memeriksa tanaman secara rutin untuk mendeteksi adanya hama atau penyakit.
   b. Penggunaan pestisida: menggunakan pestisida organik atau kimia sesuai kebutuhan dan aturan yang berlaku. Penggunaan pestisida harus dilakukan secara bijaksana dan sesuai dengan dosis serta ketentuan yang berlaku agar tidak menimbulkan residu berbahaya dan resistensi hama.

Rangkuman

Perawatan *greenhouse* melibatkan pemeriksaan rutin dan pemeliharaan berbagai komponen, seperti struktur, sistem irigasi, ventilasi, dan pencahayaan. Pembersihan dan sanitasi serta pengendalian hama dan penyakit juga merupakan bagian penting dari perawatan ini. Perawatan yang baik akan memastikan *greenhouse* berfungsi optimal, mencegah kerusakan besar, dan meningkatkan produktivitas tanaman.

B. Rehabilitasi *Greenhouse*

Rehabilitasi *greenhouse* merupakan upaya terencana untuk memulihkan dan meningkatkan fungsi bangunan serta sistem pendukungnya agar kembali beroperasi secara optimal. Proses rehabilitasi dilakukan secara bertahap dan terstruktur, dimulai dari identifikasi permasalahan hingga pemeliharaan pascarehabilitasi, sehingga keberlanjutan fungsi *greenhouse* dapat terjamin dalam jangka panjang.

Rehabilitasi *greenhouse* terjadi ketika *greenhouse* sudah mencapai umur ekonomis sehingga memerlukan perbaikan dan perawatan. Perbaikan dilakukan jika terjadi kerusakan, sedangkan perawatan adalah tindakan yang dilakukan sebelum *greenhouse* mengalami kerusakan untuk meningkatkan kinerjanya. *Greenhouse* yang tidak terawat dapat mengurangi produktivitas tanaman dan memperpendek umur teknis *greenhouse*.

Rehabilitasi diperlukan untuk mengatasi masalah seperti kerusakan struktur, penutup yang aus, dan sistem ventilasi atau irigasi yang tidak berfungsi dengan baik. Rehabilitasi bermanfaat untuk memperbaiki kinerja *greenhouse*, meningkatkan hasil panen, dan memperpanjang umur teknis *greenhouse* (Akrami *et al.*, 2020). Langkah-langkah rehabilitasi *greenhouse* dimulai dari langkah-langkah berikut ini.

1. Identifikasi masalah pada *greenhouse*

Identifikasi masalah merupakan tahap awal dan krusial dalam proses rehabilitasi *greenhouse* karena hasil dari tahap ini menjadi dasar dalam penentuan tindakan perbaikan selanjutnya. Proses identifikasi dilakukan melalui inspeksi menyeluruh terhadap seluruh komponen *greenhouse*, baik

struktural maupun fungsional. Pemeriksaan struktur dan kerangka bertujuan untuk menilai kekuatan, kestabilan, serta tingkat kerusakan akibat korosi, kelelahan material, atau pengaruh lingkungan. Sistem penutup seperti plastik UV atau kaca diperiksa untuk mendeteksi adanya sobekan, retakan, kebocoran, atau penurunan transparansi yang dapat memengaruhi intensitas cahaya di dalam *greenhouse*. Selain itu, sistem ventilasi dievaluasi untuk memastikan kelancaran sirkulasi udara dan pengendalian suhu, sementara sistem irigasi dan drainase diperiksa untuk mengidentifikasi kebocoran, penyumbatan, dan efisiensi distribusi air. Identifikasi yang cermat akan menghasilkan gambaran kondisi *greenhouse* secara menyeluruh dan akurat.

2. Perencanaan rehabilitasi

Setelah masalah diidentifikasi, langkah berikutnya adalah menyusun rencana rehabilitasi yang komprehensif, yaitu prioritas perbaikan, pemilihan bahan dan peralatan, anggaran, serta estimasi biaya. Perencanaan ini mencakup penentuan prioritas perbaikan berdasarkan tingkat kerusakan dan dampaknya terhadap operasional *greenhouse*. Selain itu, perencanaan juga meliputi pemilihan bahan dan peralatan yang sesuai dengan spesifikasi teknis *greenhouse*, daya tahan terhadap kondisi lingkungan, serta efisiensi biaya. Penyusunan anggaran dan estimasi biaya rehabilitasi dilakukan secara rinci untuk memastikan ketersediaan sumber daya dan kelancaran pelaksanaan kegiatan. Perencanaan yang matang akan meminimalkan risiko kegagalan rehabilitasi dan meningkatkan efektivitas perbaikan yang dilakukan.

3. Pelaksanaan rehabilitasi

Proses pelaksanaan melibatkan langkah-langkah praktis untuk memperbaiki kerusakan yang telah diidentifikasi, seperti perbaikan struktur dan kerangka, penggantian atau penguatan perlindungan terhadap korosi, penggantian dan perbaikan penutup, pemasangan penutup baru, perbaikan sistem ventilasi, pemeliharaan ventilasi, serta rehabilitasi sistem irigasi dan drainase.

4. Pemeliharaan setelah rehabilitasi

Tahap pemeliharaan pascarehabilitasi merupakan bagian penting untuk memastikan bahwa hasil rehabilitasi dapat bertahan dalam jangka panjang. Pemeliharaan dilakukan secara rutin dan terjadwal, mencakup pemeriksaan kondisi struktur, sistem irigasi, ventilasi, dan penutup *greenhouse*. Pemantauan kondisi *greenhouse* secara berkala diperlukan untuk mendeteksi potensi kerusakan sejak dini sehingga dapat segera ditangani sebelum berkembang menjadi masalah yang lebih besar. Selain itu, evaluasi terhadap efektivitas rehabilitasi perlu dilakukan dengan membandingkan kinerja *greenhouse* sebelum dan sesudah rehabilitasi, baik dari aspek teknis maupun produktivitas tanaman. Pemeliharaan yang berkelanjutan akan menjaga *greenhouse* tetap berfungsi secara optimal dan mendukung sistem budi daya yang efisien dan berkelanjutan.

Rangkuman

1. *Greenhouse* adalah bangunan yang berfungsi untuk melindungi dan mengoptimalkan kondisi pertumbuhan tanaman.

2. Rehabilitasi diperlukan untuk memperbaiki dan memelihara kondisi *Greenhouse*, termasuk struktur, penutup, dan sistem pendukung lainnya.
3. Langkah-langkah rehabilitasi meliputi identifikasi masalah, perencanaan, pelaksanaan, dan pemeliharaan pascarehabilitasi.

DAFTAR PUSTAKA

a. Daftar Rujukan

Akrami M, Salah AH, Javadi AA, Fath HES, Hassanein MJ, Farmani R, Dibaj M, Negm A. (2020). Towards a sustainable greenhouse: review of trends and emerging practices in analysing greenhouse ventilation requirements to sustain maximum agricultural yield. *Sustainability. 12*(7), 1–18.

Baille A. (2015). Greenhouse climate control and and automation. *Horticulture Review. 43*, 1–65.

Balázs, L., & Kovács, G. P. (2025). Effects of Light Quantity and Quality on Horticultural Crops. *Horticulturae, 11*(5), 512. https://doi.org/10.3390/horticulturae11050512.

Badan Litbang Pertanian (Balitbangtan). (2020). *Pedoman Teknis Pembangunan Greenhouse untuk Budi Daya Hortikultura*. Badan Litbang Pertanian.

Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2010). *Bangunan Pertanian – Syarat Mutu Rumah Tanaman* (SNI 7604:2010). Badan Standardisasi Nasional.

Castilla N. (2013). *Greenhouse Technology and Management*. CABI Books.

Chen S, Liu A, Tang F, Hou P, Lu Y, Yuan P. (2025). A review of environmental control strategies and models for modern agricultural greenhouses. *Sensors (Basel). 25*(5): 1388. doi: 10.3390/
s25051388. PMID: 40096199; PMCID: PMC11902451.

Chimankare RV, Das S, Kaur K, Magare D. (2023). A review study on the design and control of optimised greenhouse environments. *Journal of Tropical Ecology*. *39*: 26. doi:10.1017/ S0266467423000160.

Dixon M, Liu G. (2022). *The Advantages and Disadvantages of Fertigation*. IFAS Extension.

Erniati. (2023). *Pengembangan model jaringan saraf tiruan untuk pengendalian lingkungan budi daya tanaman melon secara hidroponik di dalam greenhouse*. [Disertasi, Institut Pertanian Bogor]. IPB University Scientific Repository.

Firmansyah A. (2023). *Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Mikro pada Berbagai Rumah Tanaman Berbasis Internet of Things* [Skripsi, Institut Pertanian Bogor]. IPB University Scientific Repository.

Ingrao C, Strippoli R, Lagioia G, Huisingh D. (2023). Water scarcity in agriculture: an overview of causes, impacts, and approaches for reducing the risks. *Heliyon*. *9*(8), 1–16.

Karina NA, Subbiah A. (2024). Development of smart greenhouse farming based on Internet of Things. *Internasional Journal of Science, Technology, and Management*. *5*(4), 898–910.

Kementerian Pertanian (Kementan). (2020). *Pedoman Teknis Pembangunan dan Pengelolaan Greenhouse Hortikultura*. Kementerian Pertanian.

Kementerian Pertanian (Kementan). (2023). *Persyaratan Teknis Pembangunan Sarana Budi Daya Florikultura: Greenhouse dan Shading House*. Kementerian Pertanian.

Kumar P, Kalbende SR. (2016). Development of an automated greenhouse system. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 5*(3), 340–343.

Kumar V, Bharti V, Chanchal, Sharma J, Anshu, Ishita, Sharma K. (2025). Fertigation: a contemporary strategy for boosting output: a review. *Plant Archive: 25*(1), 2345–2355.

Körner, O., & Challa, H. (2003). Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture, 39*(3), 173–192.

Laumal FE. (2023). Rancang bangun sistem kontrol adaptif untuk Rumah tanaman di kawasan beriklim tropika [Disertasi, Institut Pertanian Bogor]. IPB University Scientific Repository.

Mohamed AA, Ahmed MS, Mohamed FES, Rizk YA. (2025). Designing sustainable greenhouse is the future agriculture. *Pharos Engineering Science Journal* (*PESJ). 2*, 213–217.

Morib MA. (2012). Kelayakan bangunan rumah tinggal sederhana (setengah bata) terhadap kerusakan akibat gempa. *Majalah Ilmiah UKRIM. 1*(17), 67–74.

Prastono H. (2023). Sistem kendali fertigasi untuk budi daya tanaman secara hidroponik dalam rumah tanaman [Tesis, Institut Pertanian Bogor]. IPB University Scientific Repository.

Ranjan S, Sow S. (2021). Fertigation: an efficient means for fertilizer application to enhance nutrient use efficiency. *Food and Scientific Report. 2*(5), 24–27.

Rizkiani DN, Sumadyo A, Marlina A. (2020). Greenhouse sebagai wadah penelitian hortikultura pada Balai Penelitian dan Pengembangan Tanaman di Pemalang. *Senthong: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Arsitektur*. *3*(2), 461–470.

Rukmana R. (2018). *Teknologi Greenhouse dan Budi Daya Tanaman Sayuran*. Kanisius.

Scherer TF, Franzen D, Cihacek L. (2022). *Soil, Water, and Plant Characteristics Important to Irrigation*. NDSU Extension.

Singh R, Raghavendra S. (2020). Greenhouse automation systems: Concepts, design, and applications. *Journal of Agricultural Engineering*. *57*(2): 23–35.

Stanghellini C, Ooster A van't, Heuvelink E. (2019). *Greenhouse Horticulture: Technology for Optimal Crop Production*. Wageningen Academic Publishers.

Suhardiyanto H. (2023). *Teknologi Rumah Tanaman untuk Iklim Tropika Basah Pemodelan dan Pengendalian Lingkungan* (*ed ke-2)*. IPB Press.

Surya A, Istikowati WT, Sunardi, Abidin Z. (2025). Inovasi *greenhouse*: solusi ramah lingkungan untuk pertanian anggrek di Desa Sabuhur. *Tekso: Jurnal Pengabdian Teknik, Ekonomi, dan Sosial*. *1*(2), 71–78.

Tadahisa Higashide (2009). Prediction of Tomato Yield on the Basis of Solar Radiation Before Anthesis under Warm Greenhouse Conditions. *HORTSCIENCE*. *44*(7):1874–1878.

Taiz L, Zeiger E, Moller IM, Murphy A. (2015). *Plant Physiology and Development (6th edition)*. Sinauer Associates

von Zabeltitz C. (2011). *Integrated Greenhouse System for Mild Climates (Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control).* Springer- Verlag.

b. Sumber Bacaan

Bot GPA. (1983). *Greenhouse Climate: fiom Physical Processes to a Dynamic Model*. [Thesis, Agricultural University of Wageningen]. The Netherlands.

Direktorat Jenderal Hortikultura. (2021). *Standar Minimal Greenhouse*. Direktorat Jenderal Hortikultura.

Shamshiri RR, Kalantari F, Ting KC, Thorp KR, Hameed IA, Weltzien C, Ahmad D, Shad ZM. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A review. *Biosystems Engineering*. *173*,303–318.

Sun X, Li Y, Heinen M, Ritzema H, Hellegers P, van Dam J. (2023). Fertigation strategies to improve water and nitrogen use efficiency in surface irrigation system in North China Plain. *Agriculture*. *13*(17), 1–23.

Yuwono AS, Hasbullah R, Chadirin Y. (2017). *Lingkungan dan Bangunan Pertanian (Farm Structure and Environment)*. IPB Press.

BIODATA PENULIS

Dr. Erniati, STP., M.Sc. merupakan dosen pada Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian di Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor yang memiliki keahlian di bidang Keteknikan Pertanian. Pendidikan yang ditempuh adalah S1 Teknik Pertanian di Universitas Brawijaya, S2 Teknik Pertanian di Universitas Gadjah Mada, serta meraih gelar Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian di Institut Pertanian Bogor. Sebelum menjadi dosen, penulis berkarier di Badan Ketahanan Pangan Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Selain aktif mengajar berbagai mata kuliah seperti Teknik Greenhouse, Energi dan Elektrifikasi, Kekuatan Bahan, dan Aplikasi Komputer, beliau juga produktif dalam penelitian dan publikasi ilmiah terkait smart farming, greenhouse tropis, kecerdasan buatan pada pertanian, serta sistem pertanian berbasis energi terbarukan. Penulis pernah menjadi anggota Tim Perumus Kaji ulang SKKNI Bidang Alsintan dan Bidang Budi Daya Tebu dan Pengolahan Gula Kristal Putih, anggota penyusun buku Good Agriculture Practices: Purwoceng, Budidaya Herbal Langka dari Jawa (IPB Press) dan Mekanisasi Pertanian (Yayasan Kita Menulis). Saat ini, penulis juga sebagai Ketua Kelompok Substansi Administrasi, Akademik, Kemahasiswaan dan Alumni di Polbangtan Bogor.

Annisa Nur Ichniarsyah, M.Si. merupakan lulusan dari Program Sarjana Teknik Pertanian dan Program Magister Teknik Mesin Pertanian dan Pangan, IPB dengan bidang keilmuan mesin pertanian. Penulis pernah mengajar di Program Studi Agroekoteknologi di Universitas Trilogi sejak tahun 2014. Di tahun 2019, penulis menjadi dosen tetap Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian Politeknik Pembangunan

Pertanian (Polbangtan) Bogor, perguruan tinggi vokasi di bawah Kementerian Pertanian. Penulis mengampu mata kuliah Perbengkelan, Pengujian Mesin dan Peralatan Pertanian, Sistem Kontrol dan Otomasi, Gambar Teknik, dan mata kuliah teknis lainnya. Selain sebagai pengajar, penulis juga berperan aktif juga sebagai editor Jurnal Agroekoteknologi dan Agribisnis. Penulis juga merupakan pengelola Korean Smart Greenhouse yang ada di Polbangtan Bogor. Penulis pernah menjadi penyusun Pedoman Pertanian Perkotaan yang dikomandoi oleh Otorita Ibu Kota Nusantara dan menjadi kontributor dalam buku Teknik Budidaya Tanaman Pangan yang diterbitkan oleh Yayasan Kita Menulis.

Dr. Folkes E. Laumal, S.T. M.T., adalah dosen dan peneliti di bidang kontrol cerdas, otomasi, Internet of Things, serta rekayasa sistem pertanian presisi di Politeknik Negeri Kupang. Aktif mengembangkan berbagai riset terkait smart irrigation, monitoring lingkungan berbasis sensor, sistem kendali adaptif, energi terbarukan untuk pertanian lahan kering, serta integrasi kecerdasan buatan pada sistem otomasi pertanian tropis. Kegiatan penelitian dan publikasi mencakup pengembangan sistem irigasi cerdas berbasis IoT, prediksi parameter lingkungan menggunakan Artificial Neural Network, serta sistem hybrid energi untuk mendukung pertanian berkelanjutan di wilayah beriklim kering tropis. Aktivitas akademik juga diperkuat melalui publikasi internasional terindeks Scopus, keterlibatan dalam kegiatan editorial jurnal, serta kolaborasi riset dengan berbagai perguruan tinggi dan lembaga penelitian di Indonesia. Selain bidang akademik dan penelitian, kontribusi pengabdian masyarakat dilakukan

melalui penerapan teknologi tepat guna untuk pertanian dan pengolahan hasil pertanian di wilayah Nusa Tenggara Timur.

Dr. Ir. Soesilo Wibowo, M.S. merupakan dosen tidak tetap pada Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian di Politeknik Pembangunan Pertanian (Polbangtan) Bogor yang memiliki keahlian di bidang Keteknikan Pertanian. Pendidikan yang ditempuh adalah S1 pada Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Gadjah Mada (UGM) lulus Tahun 1978, S2 Pada Fakultas Pascasarjana Institut Pertanian Bogor (IPB) diraih pada Tahun 1986 serta meraih gelar Doktor (S3) Ilmu Pengelolaa SDA dan Lingkungan Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor pada Tahun 2009. Sebelum menjadi dosen, penulis mengawali kariernya sebagai Penyuluh Pertanian di Satuam Pengendali Bimas Kabupaten Luwu, Propinsi Sulawesi Selatan, dan menjadi Kepala Rural Extension Center (REC) Bone-Bone merangkap Kepala Irrigation Pilot Scheme (IPS) Bone-Bone, Kabupaten Luwu kemudian menjadi dosen pada Sekolah Tinggi Penyuluhan Pertanian (STPP) Bogor Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Penulis pernah menjabat sebagai Ketua STPP Magelang pada Tahun 2006 -2010. Setelah purna tugas, mulai Tahun 2018 aktif mengajar berbagai mata kuliah di Polbangtan Bogor seperti Teknik Greenhouse, Teknik Irigasi dan Fertigasi, Alat dan Mesin Pertanian (Alsintan), Alsintan Prapanen dan Traktor pertanian, serta Sistem pertanian berkelanjutan. Penulis juga aktif sebagai asesor sejak Tahun 2012 pada bidang rumpun ilmu hayat pertanian untuk skema-skema Penyuluhan Pertanian, Pangan segar dan Pertanian Organik.

PEMBELAJARAN TEKNIK *GREENHOUSE*

Greenhouse merupakan salah satu teknologi pertanian modern yang memiliki peran sangat penting dalam upaya meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil pertanian. Teknologi ini terbukti sangat penting dalam menjaga dan meningkatkan kualitas produk, terutama di tengah tantangan perubahan iklim. Oleh karena itu, penguasaan konsep dasar dan implementasinya menjadi kunci bagi pertanian berkelanjutan.

Melalui buku ini, diharapkan para pembaca dapat memahami berbagai aspek yang terkait dengan penggunaan *greenhouse*. Pembaca akan diajak untuk mulai menyelami konsep dasar, mengusai sistem kontrol lingkungan yang optimal, hingga menguasai teknik budi daya tanaman yang efektif.

Setiap bab telah disusun secara sistematis sebagai panduan yang mudah diikuti baik bagi pemula maupun praktisi. Agar dapat memastikan penguasaan materi, modul ini juga diperkaya dengan berbagai latihan aplikatif untuk memperdalam pemahaman praktis pembaca. Bersiaplah untuk mengubah cara bertani dan menghasilkan produk pertanian unggul yang berkualitas tinggi dan berkelanjutan melalui buku ini.

PERTANIAN PRESS

Redaksi Pertanian Press
Balai Besar Perpustakaan dan Literasi Pertanian
Jl. Ir. H. Juanda No.20, Bogor 16122.

ISBN 978-979-562-447-3 (PDF)
9 789795 824473