

**PENGARUH PENINGKATAN KONSENTRASI CO₂ DI ATAS KANOPI TANAMAN
TERHADAP PERTUMBUHAN, PRODUKSI, DAN FENOLOGI TANAMAN
KEDELAI (*Glycine max* L.): STUDI DAMPAK PERUBAHAN
IKLIM PADA TANAMAN**

(Skripsi)

Oleh

**FATIMA SALSHABILLA
NPM 2114161007**



**UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

PENGARUH PENINGKATAN KONSENTRASI CO₂ DI ATAS KANOPI TANAMAN TERHADAP PERTUMBUHAN, PRODUKSI, DAN FENOLOGI TANAMAN KEDELAI (*Glycine max* L.): STUDI DAMPAK PERUBAHAN IKLIM PADA TANAMAN

Oleh

Fatima Salshabilla

Peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer sebagai dampak perubahan iklim global berpotensi memengaruhi respons fisiologis, pertumbuhan, fenologi, dan produktivitas tanaman kedelai (*Glycine max* L.). Namun, respons tanaman terhadap peningkatan CO₂ yang tidak selalu konsisten menunjukkan perlunya penelitian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh peningkatan konsentrasi CO₂ di atas kanopi terhadap fenologi, pertumbuhan, dan produksi tiga varietas kedelai, yaitu Dena 1, Deja 1, dan Grobogan. Penelitian menggunakan rancangan Strip Plot dalam Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan dua taraf CO₂, yaitu -CO₂ dan +CO₂, serta tiga varietas kedelai. Variabel yang diamati meliputi fenologi tanaman, akumulasi panas (GDD), pertumbuhan, dan hasil produksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa +CO₂ tidak memberikan pengaruh nyata terhadap sebagian besar variabel pertumbuhan dan produksi tanaman kedelai. Perlakuan -CO₂ menghasilkan bobot 1000 butir yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan +CO₂. Ketiga varietas kedelai menunjukkan respons yang relatif seragam terhadap peningkatan konsentrasi CO₂. Perlakuan +CO₂ menyebabkan perubahan waktu pencapaian beberapa fase fenologi tanaman kedelai, terutama pada fase generatif, serta cenderung meningkatkan kebutuhan GDD. Namun interaksi antara CO₂ dan varietas tidak berpengaruh nyata terhadap seluruh variabel yang diamati. Secara keseluruhan, peningkatan konsentrasi CO₂ pada kondisi penelitian ini tidak menunjukkan pengaruh yang konsisten terhadap pertumbuhan dan produksi kedelai.

Kata kunci: Karbon Dioksida, Fenologi, Kedelai, Pertumbuhan, Produksi.

ABSTRACT

THE EFFECT OF INCREASED CO₂ CONCENTRATION ABOVE THE PLANT CANOPY ON GROWTH, YIELD, AND PHENOLOGY OF SOYBEAN (*Glycine max* L.): A STUDY OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON CROPS

By

Fatima Salshabilla

Elevated atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration, driven by global climate change, significantly influences the physiology, growth, phenology, and productivity of soybean (*Glycine max* L.). However, plant responses to elevated CO₂ remain inconsistent, necessitating further investigation. This study aimed to examine the effects of above-canopy elevated CO₂ concentrations on the phenology, growth, and yield of three soybean varieties: Dena 1, Deja 1, and Grobogan. The experiment was arranged in a Strip Plot Design within a Randomized Complete Block Design (RCBD), involving two CO₂ levels (-CO₂ and +CO₂) and three varieties. Observed variables included phenological stages, Growing Degree Days (GDD) accumulation, growth parameters, and yield components. Results indicated that +CO₂ had no significant effect on most growth and yield parameters, except for 1000-seed weight, which was higher in the -CO₂ treatment. While the varieties exhibited similar physiological responses to CO₂ enrichment, +CO₂ tended to alter the timing of specific reproductive stages and increased GDD requirements. Notably, no significant interaction between CO₂ levels and varieties was observed for any measured variable. Overall, under the experimental conditions, elevated CO₂ did not consistently enhance soybean productivity, suggesting that other environmental factors may modulate the soybean response to CO₂ enrichment.

Keywords: Carbon Dioxide, Phenology, Soybean, Growth, Yield.

**PENGARUH PENINGKATAN KONSENTRASI CO₂ DI ATAS KANOPI TANAMAN
TERHADAP PERTUMBUHAN, PRODUKSI, DAN FENOLOGI TANAMAN
KEDELAI (*Glycine max* L.): STUDI DAMPAK PERUBAHAN
IKLIM PADA TANAMAN**

Oleh

FATIMA SALSHABILLA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA PERTANIAN**

Pada

**Jurusan Agronomi dan Hortikultura
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

: PENGARUH PENINGKATAN
KONSENTRASI CO₂ DI ATAS KANOPI
TANAMAN TERHADAP
PERTUMBUHAN, PRODUKSI, DAN
FENOLOGI TANAMAN KEDELAI
(*Glycine max* L.): STUDI DAMPAK
PERUBAHAN IKLIM PADA
TANAMAN

Nama Mahasiswa

: Fatima Salshabilla

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2114161007

Jurusan

: Agronomi dan Hortikultura

Fakultas

: Pertanian

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Prof. Dr. Ir. Tumiar Katarina B. Manik, M.Sc.
NIP 196302021987032001



Prof. Dr. Ir. Paul Benyamin Timotiwiu, M.S.
NIP 196209281987031001

2. Ketua Jurusan Agronomi dan Hortikultura



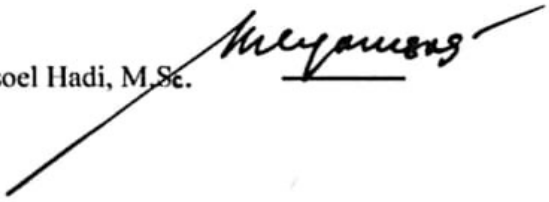
Prof. Ir. Maria Viva Rini, M.Agr.Sc., Ph.D.
NIP 196603041990122001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Dr. Ir. Tumiar Katarina B. Manik, M.Sc. 

Sekretaris : Prof. Dr. Ir. Paul Benyamin Timotiwiu, M.S. 

Penguji
Bukan Pembimbing : Dr. Ir. Muhammad Syamsoel Hadi, M.Sc. 

2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.
NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 02 Juni 2026

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini, menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pengaruh Peningkatan Konsentrasi CO₂ di Atas Kanopi Tanaman terhadap Pertumbuhan, Produksi, dan Fenologi Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.): Studi Dampak Perubahan Iklim Pada Tanaman”** merupakan hasil karya yang saya tulis sendiri bukan hasil karya orang lain. Semua hasil yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa skripsi ini merupakan hasil Salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026
Penulis,



Fatima Salshabilla
NPM 2114161007

RIWAYAT HIDUP

Penulis merupakan mahasiswa Jurusan Agronomi dan Hortikultura Fakultas Pertanian Universitas Lampung angkatan 2021. Penulis dilahirkan di Kecamatan Way Pengubuan, Lampung Tengah pada tanggal 20 Oktober 2002 dari pasangan Bapak Eko Wahyudi dan Ibu Dewi Churniasih, S.Pd. Penulis menyelesaikan Pendidikan Sekolah Dasar di SDN 2 Banjar Kertahayu pada tahun 2015. Kemudian, penulis melanjutkan Pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Terbanggi Besar pada tahun 2018 dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Terbanggi Besar pada tahun 2021.

Penulis berpengalaman menjadi Asisten Praktikum pada mata kuliah Produksi Tanaman Hortikultura tahun 2024, Nutrisi Tanaman tahun 2024, dan Pemuliaan Tanaman tahun 2025. Penulis juga mengikuti kegiatan Praktik Umum (PU) di PT Perkebunan Nusantara 1 Regional 2 Kebun Ciater, Subang, Jawa Barat pada bulan Juli–Agustus tahun 2024. Kegiatan *non*-akademik yang pernah diikuti adalah menjadi anggota bidang Dana dan Usaha HIMAGRHO periode 2023 dan Bendahara Umum HIMAGRHO periode 2024.

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Tiada kata yang lebih indah selain puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas karunia dan rahmat-Nya yang senantiasa tercurah. Dengan segala kerendahan hati dan rasa syukur yang mendalam, penulis mempersembahkan skripsi ini kepada:

Terkhusus:

Kedua Orangtua Penulis,
Bapak Eko Wahyudi dan Ibunda Dewi Churniasih,
yang selalu mendukung dengan sepenuh hati, mempercayai setiap langkah, serta tak pernah berhenti mendoakan.

Kakak Penulis
Muhammad Fajar Wahyudi

Adik Penulis
Rahmadya Zarifa dan Fardef Hilbram
Seluruh keluarga dan sahabat-sahabat penulis

Terima kasih atas semangat yang selalu diberikan serta kebersamaan dalam suka maupun duka. Semoga setiap ilmu dalam skripsi ini dapat menjadi penyemangat untuk terus melangkah lebih jauh, berbuat lebih baik, dan memberi manfaat yang lebih luas.

Almamater tercinta,
Universitas Lampung

MOTTO

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan, sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”
(QS. Al-Insyirah: 5-6)

*“If you never bleed, you’re never gonna grow”
”long story short, we survived”*
(Taylor Swift)

“And you’re always free to begin again, and you’re always free to believe”
(Barbie as the Princess and the Pauper)

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas kasih dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Peningkatan Konsentrasi CO₂ di Atas Kanopi Tanaman terhadap Pertumbuhan, Produksi, dan Fenologi Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.): Studi Dampak Perubahan Iklim pada Tanaman”**, dengan lancar. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Pertanian di Fakultas Pertanian Universitas Lampung.

Penyelesaian skripsi ini merupakan hasil akhir dari sebuah perjalanan akademik yang tidak mungkin terwujud tanpa bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Atas dasar itu, penulis dengan tulus ingin mengucapkan terima kasih dan menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

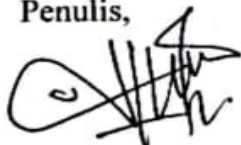
1. Bapak Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Tumiar Katarina B. Manik, M.Sc. selaku Dosen Pembimbing utama atas bimbingan, ilmu, dukungan, saran, nasihat serta motivasi berharga sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Paul Benyamin Timotiwu, M.S. selaku Pembimbing II sekaligus Dosen Pembimbing Akademik atas bimbingan, arahan, ilmu, dukungan, saran, dan motivasi berharga sejak awal masa studi hingga penyusunan skripsi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Ir. Muhammad Syamsoel Hadi, M.S. selaku Dosen Penguji atas kesediaan yang sangat berharga, saran, kritik, dan arahan yang membantu bagi penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

5. Ibu Prof. Ir. Maria Viva Rini, M.Agr.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Agronomi dan Hortikultura, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
6. Kedua orang tua tercinta Bapak Eko Wahyudi dan Ibu Dewi Churniasih, terima kasih yang tak terhingga atas doa yang tak pernah putus, segala pengorbanan, serta kasih sayang tulus yang diberikan kepada penulis. Setiap langkah penulis tidak lepas dari dukungan dan kepercayaan yang selalu diberikan, terima kasih selalu hadir memberikan semangat dan menjadi alasan penulis untuk berjuang meraih gelar sarjana ini.
7. Kakak dan adik tersayang, serta keluarga besar penulis, terima kasih atas kebersamaan, perhatian, dan semangat yang selalu hadir dalam setiap proses, sehingga penulis dapat bertahan hingga mencapai tahap ini.
8. Sahabat selama perkuliahan sekaligus teman penelitian dan pembimbing akademik yang sama, Nova Rosita Aryanti, serta sahabat yang telah memberikan bantuan selama penelitian dan proses penyusunan skripsi, terutama Garda Alfitra Gumay, lalu Mita Ardila, Dwi Cahyani, Ashabilla Wardatunnisa, Nurul Hanifah, Wafiqah Ambari, serta Presidium Inti HIMAGRHO 2024, yang juga menemani perjalanan perkuliahan penulis dengan kebersamaan, tawa, dan dukungan.
9. Terima kasih untuk seluruh pihak terkait yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu atas segala bantuan dan kontribusinya dalam penyelesaian skripsi ini.

Semoga Allah SWT membalas kebbaikannya dan selalu diberikan kelimpahan rahmat, nikmat dan lindungan-Nya atas seluruh bantuan dan dukungan kepada penulis. Besar harapan penulis bahwa substansi skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca secara umum, serta bagi penulis secara khusus. Aamiin.

Bandar Lampung, 29 Juni 2026

Penulis,



Fatima Salshabilla

DAFTAR ISI

	Halaman
SANWACANA.....	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
 I. PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Landasan Teori	5
1.5 Kerangka Pemikiran.....	8
1.6 Hipotesis.....	10
 II. TINJAUAN PUSTAKA	 11
2.1 Perubahan Iklim dan Pemanasan Global.....	11
2.2 Klasifikasi dan Morfologi Tanaman Kedelai (<i>Glycine max</i> L.)	12
2.2.1 Klasifikasi Tanaman Kedelai (<i>Glycine max</i> L.).....	12
2.2.2 Morfologi Tanaman Kedelai (<i>Glycine max</i> L.).....	13
2.2.3 Fase Pertumbuhan Tanaman Kedelai.....	14
2.2.3.1 Pertumbuhan Vegetatif (V).....	15
2.2.3.2 Pertumbuhan Generatif dan Reproduksi (R)	16
2.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Kedelai	18
2.4 Teori Fotosintesis.....	18
2.5 Pengaruh Peningkatan CO ₂ Terhadap Fotosintesis Tanaman Kedelai.....	19

2.6 Fenologi Tanaman	21
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	22
3.1 Waktu dan Tempat	22
3.2 Alat dan Bahan	22
3.3 Metode Penelitian.....	22
3.4 Petak Percobaan	23
3.5 Pelaksanaan Penelitian	23
3.5.1 Persiapan Media Tanam.....	23
3.5.2 Pembuatan Karbon Dioksida (CO ₂).....	24
3.5.3 Pengaplikasian Karbon Dioksida (CO ₂)	25
3.5.4 Penanaman.....	25
3.5.5 Pemeliharaan Tanaman	25
3.5.5.1 Penyiraman.....	25
3.5.5.2 Penyiangan Gulma	26
3.5.6 Pemupukan.....	26
3.5.7 Pemanenan	27
3.6 Variabel Pengamatan	27
3.6.1 Fenologi Tanaman.....	27
3.6.2 Tinggi Tanaman (cm).....	29
3.6.3 Jumlah Daun (helai).....	29
3.6.4 Bobot Segar Brangkasan (gram).....	29
3.6.6 Bobot 1000 Butir (gram).....	30
3.7 Pengolahan Data.....	30
3.7.1 <i>Growing Degree Days</i> (GDD)	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Hasil.....	32
4.1.1 Kadar Karbon Dioksida (CO ₂).....	32
4.1.2 Fenologi	32
4.1.3 <i>Growing Degree Days</i> (GDD)	33
4.1.4 Pertumbuhan dan Produksi Tanaman.....	37
4.2 Pembahasan.....	40
4.2.1 Kondisi Konsentrasi CO ₂ dalam Sungkup	40

4.2.2 Fenologi dan <i>Growing Degree Days</i> (GDD)	41
4.2.3 Pertumbuhan dan Produksi	48
V. KESIMPULAN	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Fase pertumbuhan vegetatif tanaman kedelai	16
2. Fase pertumbuhan generatif atau reproduktif pada tanaman kedelai.....	17
3. Kadar karbon dioksida (CO ₂) di dalam sungkup	32
4. Tahapan fenologi tiga varietas tanaman kedelai	33
5. Suhu maksimum dan minimum di lokasi penelitian	34
6. <i>Growing Degree Days</i> (GDD) tiga varietas tanaman kedelai.....	35
7. Rekapitulasi analisis ragam setiap variabel pengamatan	37
8. Pengaruh varietas terhadap rata-rata bobot segar brangkasan tanaman kedelai (g).....	38
9. Pengaruh varietas terhadap rata-rata bobot kering brangkasan tanaman kedelai (g).....	38
10. Pengaruh penambahan CO ₂ terhadap rata-rata bobot segar akar tanaman kedelai (g).....	39
11. Pengaruh penambahan CO ₂ terhadap rata-rata bobot kering akar tanaman kedelai (g).....	39
12. Pengaruh penambahan CO ₂ terhadap bobot 1000 butir tanaman kedelai (g).....	40
13. Perbandingan waktu pencapaian tahap pertumbuhan tiga varietas kedelai antara deskripsi varietas unggul BSIP (2024) dan hasil penelitian	43
14. Nilai rata-rata tinggi tanaman dan jumlah daun	56
15. Nilai rata-rata bobot segar brangkasan dan bobot kering brangkasan	57
16. Nilai rata-rata kadar air benih	58
17. Nilai rata-rata bobot segar akar	59
18. Nilai rata-rata bobot kering akar	60
19. Nilai rata-rata bobot 1000 butir.....	61

20. Hasil uji Shapiro untuk kenormalan data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar brangkasan.....	62
21. Hasil uji Bartlett untuk homogenitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar brangkasan.....	62
22. Hasil uji Tukey untuk aditivitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar brangkasan.....	62
23. Hasil analisis ragam antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar brangkasan.....	62
24. Nilai koefisien keragaman antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar brangkasan	62
25. Hasil uji Shapiro untuk kenormalan data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering brangkasan.....	63
26. Hasil uji Bartlett untuk homogenitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering brangkasan.....	63
27. Hasil uji Tukey untuk aditivitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering brangkasan.....	63
28. Hasil analisis ragam antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering brangkasan.....	63
29. Nilai koefisien keragaman antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering brangkasan	63
30. Hasil uji Shapiro untuk kenormalan data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar akar.....	64
31. Hasil uji Bartlett untuk homogenitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar akar.....	64
32. Hasil uji Tukey untuk aditivitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar akar.....	64
33. Hasil analisis ragam antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar akar.....	64
34. Nilai koefisien keragaman antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot segar akar.....	64
35. Hasil uji Shapiro untuk kenormalan data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering akar.....	65

36. Hasil uji Bartlett untuk homogenitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering akar.....	65
37. Hasil uji Tukey untuk aditivitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering akar.....	65
38. Hasil analisis ragam antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering akar	65
39. Nilai koefisien keragaman antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot kering akar.....	65
40. Hasil uji Shapiro untuk kenormalan data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada kadar air benih.....	66
41. Hasil uji Bartlett untuk homogenitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada kadar air benih.....	66
42. Hasil uji Tukey untuk aditivitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada kadar air benih.....	66
43. Hasil analisis ragam antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada kadar air benih	66
44. Nilai koefisien keragaman antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada kadar air benih	66
45. Hasil uji Shapiro untuk kenormalan data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot 1000 butir benih	67
46. Hasil uji Bartlett untuk homogenitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot 1000 butir benih	67
47. Hasil uji Tukey untuk aditivitas data antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot 1000 butir benih	67
48. Hasil analisis ragam antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot 1000 butir benih.....	67
49. Nilai koefisien keragaman antarperlakuan kombinasi pengaruh penambahan CO ₂ (CO ₂) dan varietas (V) pada bobot 1000 butir benih	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran	8
2. Tahap pertumbuhan tanaman kedelai	15
3. Tahapan pertumbuhan reproduksi kedelai	15
4. Petak percobaan	23
5. Proses pembuatan CO ₂ (a) gula, (b) ragi, (c) baking soda, (d) botol CO ₂	24
6. Pengaplikasian CO ₂ di dalam sungkup	25
7. Fase vegetatif tanaman kedelai (a) perkecambahan kedelai, (b) daun pertama membuka penuh, (c) daun trifoliolate, (d) stadia buku ke-2, (e) stadia buku ke-3	28
8. Fase generatif tanaman kedelai (a) awal muncul bunga, (b) pembungaan penuh, (c) awal pembentukan polong, (d) perkembangan polong, (e) pengisian polong	28
9. Fase matang fisiologi dan kematangan panen tanaman kedelai (a) matang fisiologi, (b) kematangan panen	29
10. Tahap pertumbuhan tiga varietas kedelai di dataran rendah perlakuan tanpa penambahan CO ₂ dan dengan penambahan CO ₂	42
11. Nilai <i>Growing Degree Days</i> (GDD) tanaman kedelai berdasarkan fase pertumbuhan (a) Varietas 1, (b) Varietas 2, (c) Varietas 3	45
12. Tiga varietas benih kedelai (Dena 1, Deja 1, dan Grobogan)	68
13. Media tanam kedelai	68
14. Alat pengukur suhu dan kelembapan (data logger)	68
15. Tanaman kedelai terserang hama ulat	68
16. Gejala stress panas pada daun yang berada di dalam sungkup	69
17. Polong kecil akibat stress panas	69
18. Alat detektor CO ₂	69
19. Penjemuran polong yang telah dipanen	69

20. Pengukuran bobot segar betrangkasan	69
21. Brangkasan dioven pada suhu 80 °C selama 3 hari	69
22. Tanaman layu diakibatkan suhu di lingkungan sungkup panas	70

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Nilai rata-rata variabel pengamatan	56
2. Analisis statistik data variabel.....	62
3. Gambar kegiatan penelitian.....	68

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim yang ditandai dengan kenaikan suhu dan pergeseran distribusi hujan adalah hal yang tak dapat dihindari. Salah satu penyebab utamanya adalah peningkatan emisi gas rumah kaca. Gas rumah kaca yang dominan di atmosfer meliputi karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen monoksida (N₂O), bersama dengan beberapa gas lainnya. Kegiatan manusia, seperti pembakaran bahan bakar fosil dan penggundulan hutan, telah menyebabkan meningkatnya emisi gas rumah kaca. Kondisi ini menyebabkan pemanasan global dan memperkuat efek rumah kaca, yang semakin tinggi dari waktu ke waktu. Perubahan iklim yang tidak diimbangi dengan upaya mitigasi yang memadai berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem, termasuk pada kegiatan pertanian serta melemahkan sistem ketahanan pangan dunia (Irma dkk., 2024).

Menurut data Badan Penerbangan dan Antariksa Amerika Serikat (2022), tingkat konsentrasi karbon dioksida di atmosfer global sudah mencapai rata-rata 417,6 ppm yang mengalami peningkatan 6,2% dibanding tahun 2011. Di Indonesia, emisi CO₂ juga mengalami peningkatan baik dari segi konsentrasi maupun jumlahnya. Rata-rata konsentrasi karbon dioksida di Indonesia pada tahun 2021 berdasarkan catatan GAW mencapai 414,2 ppm. Peningkatan konsentrasi karbon dioksida di atmosfer yang menjadi penyebab perubahan iklim, dapat mengakibatkan perubahan yang signifikan pada struktur dan fungsi ekosistem alami yang juga memengaruhi pertumbuhan dan produksi tanaman (Zheng *et al.*, 2019).

Secara teori, peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan menyerap lebih banyak molekul CO₂ untuk melakukan fotosintesis. Beberapa penelitian meninjau bahwa pertumbuhan tanaman dapat ditingkatkan dengan menambah konsentrasi CO₂, seperti respons rumput liar pada peningkatan CO₂ dapat meningkatkan total biomassa C3 spesies rumput sekitar 50% (Wang, 2010). Namun, peneliti lain menunjukkan bahwa peningkatan CO₂ dapat menurunkan pertumbuhan tanaman, bahkan dapat menyebabkan efek buruk pada beberapa tanaman ketika konsentrasi CO₂ di atas 1000 ppm (Yu *et al.*, 2012). Menurut Ming Xu (2015), tanaman yang berbeda spesies kemungkinan memiliki konsentrasi CO₂ optimal yang berbeda, ketika pemberian CO₂ dengan konsentrasi tinggi kemungkinan akan berdampak positif pada tanaman. Respons tanaman terhadap peningkatan konsentrasi CO₂ pada dasarnya dipengaruhi oleh proses fotosintesis pada daun, yang berkaitan dengan perubahan struktur daun atau tipe fungsional tanaman (Zheng *et al.*, 2019). Peningkatan konsentrasi CO₂ ini dapat meningkatkan kecepatan laju fotosintesis tanaman dan menurunkan respirasinya, sehingga dapat mengganggu metabolisme dan pertumbuhan dari tanaman tersebut (Kusumaputri, 1998).

Salah satu pendekatan untuk mengkaji dampak perubahan iklim terhadap tanaman adalah dengan mengamati pengaruh peningkatan suhu terhadap laju pertumbuhan dan hasil produksi tanaman. Respons tanaman terhadap perubahan ini dapat dikaji melalui fenologi tanaman, yaitu studi tentang waktu terjadinya berbagai tahap pertumbuhan tanaman, seperti durasi yang dibutuhkan suatu tanaman untuk mencapai fase pembungaan. Fenologi tanaman menjadi salah satu indikator paling sederhana dan efektif dalam mengukur dampak perubahan iklim. Fenologi tanaman adalah tahapan pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang dipengaruhi oleh lingkungan, terutama iklim (Aryani dkk., 2023).

Fenologi tanaman, yang menggambarkan berbagai tahap pertumbuhan tanaman, dapat diukur secara kuantitatif menggunakan konsep yang dikenal sebagai *Growing Degree Days* (GDD). GDD merupakan ukuran akumulasi suhu yang digunakan untuk memperkirakan kecepatan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Konsep ini didasarkan pada prinsip bahwa pertumbuhan tanaman

bergantung pada jumlah panas yang diterima, dengan setiap jenis tanaman yang memiliki suhu dasar tertentu. Perhitungan GDD dilakukan dengan menjumlahkan selisih antara suhu rata-rata harian dan suhu dasar dalam rentang waktu tertentu. GDD dapat dimanfaatkan untuk menentukan waktu tanam yang optimal, mengatur sistem irigasi, serta mengelola hama dan penyakit secara lebih efektif (Timotiwu dkk., 2021).

Kedelai (*Glycine max* L.) merupakan komoditas pangan terpenting ketiga setelah padi dan jagung. Faktor lingkungan di atas permukaan tanah yang memengaruhi pertumbuhan kedelai meliputi intensitas cahaya, suhu udara, serta kandungan CO₂. Lama penyinaran yang ideal bagi tanaman kedelai sekitar 10-12 jam. Kedelai merupakan komoditas pangan utama dalam pembuatan tahu dan tempe sebagai pangan yang digemari oleh masyarakat Indonesia. Sehingga kebutuhan kedelai di Indonesia semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk. Berdasarkan data BPS tahun 2023, produksi kedelai nasional mencapai 555.000 ton sedangkan permintaan dalam negeri mencapai 2,7 juta ton. Sehingga, produksi kedelai di Indonesia baru mampu memenuhi permintaan (kebutuhan) sekitar 20,56% dari total kebutuhan. Hal ini disebabkan oleh penambahan penduduk dan berkembangnya industri pangan serta pakan yang menyebabkan permintaan kedelai terus meningkat, sehingga produksinya harus terus ditingkatkan untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (Swastika, 2015).

Perubahan iklim memberikan dampak signifikan terhadap ketahanan pangan global, terutama pada produksi kedelai. Sebagai tanaman yang sensitif terhadap kondisi lingkungan, kedelai sangat terpengaruh oleh perubahan pola curah hujan dan suhu udara. Ketika musim kemarau berlangsung lebih panjang, kekeringan dapat menyebabkan penurunan kadar air tanah, menghambat pertumbuhan tanaman, dan berujung pada kegagalan panen. Sebaliknya, saat musim hujan dengan curah hujan tinggi, kelembapan yang berlebih dapat meningkatkan risiko serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), seperti hama dan penyakit yang dapat merusak hasil panen (Malau dkk., 2023). Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer memiliki dampak yang kompleks terhadap ketahanan pangan. Meskipun CO₂ merupakan komponen penting dalam proses fotosintesis serta meningkatkan

laju fotosintesis pada beberapa tanaman, efek ini tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan hasil panen. Oleh karena itu, meskipun peningkatan CO₂ dapat memberikan manfaat tertentu bagi pertumbuhan tanaman, dampak negatifnya terhadap perubahan iklim dan ketahanan pangan secara keseluruhan perlu diperhatikan (Apriyana dkk., 2016).

Meskipun peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) secara teoritis dapat meningkatkan fotosintesis dan pertumbuhan tanaman kedelai, hasil penelitian sebelumnya masih menunjukkan respons yang beragam. Perbedaan tersebut diduga dipengaruhi oleh varietas tanaman dan kondisi lingkungan.

Penelitian mengenai respons beberapa varietas kedelai unggul di Indonesia terhadap peningkatan CO₂, khususnya pada kondisi dataran rendah, masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh peningkatan konsentrasi CO₂ di atas kanopi terhadap fenologi, pertumbuhan, dan produksi tanaman kedelai.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah peningkatan karbon dioksida (CO₂) di atas kanopi dapat memengaruhi pertumbuhan, produksi dan fenologi tanaman kedelai (*Glycine max* L.)?
2. Bagaimana tanggapan varietas kedelai yang berbeda terhadap peningkatan karbon dioksida (CO₂) di atas kanopi tanaman?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Untuk mengetahui pengaruh peningkatan karbon dioksida (CO₂) di atas kanopi terhadap pertumbuhan, produksi dan fenologi tanaman kedelai (*Glycine max* L.).
2. Untuk mengetahui tanggapan tiga varietas kedelai yang berbeda terhadap peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di atas kanopi.

1.4 Landasan Teori

Pemanasan global merupakan salah satu isu yang paling banyak diperbincangkan saat ini. Gas-gas rumah kaca di atmosfer telah menyebabkan peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, serta perubahan iklim. Salah satu gas rumah kaca yang mendapat perhatian besar adalah karbon dioksida karena peranannya dalam siklus biogeokimia di wilayah pesisir dan laut terbuka (Prasetyawan dkk., 2017). Pemanasan global ini terjadi karena efek rumah kaca dengan emisi karbon dioksida yang paling dominan. Emisi karbon sebagian besar diakibatkan dari aktivitas manusia yang berdampak bagi lingkungan. Semakin banyak aktivitas yang dilakukan, maka semakin tinggi emisi yang dilepaskan ke atmosfer (Admaja dkk., 2018). Peningkatan gas rumah kaca tersebut memicu perubahan iklim yang dapat berdampak pada ekosistem alami, terutama di sektor pertanian. Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, sektor pertanian menyumbang 8% dari total emisi gas rumah kaca nasional pada tahun 2018 dengan sumber utama berasal dari lahan sawah sebanyak 69% serta fermentasi enterik ternak sekitar 38%.

Konsentrasi CO₂ di atmosfer juga terus bertambah dan memberikan pengaruh terhadap fisiologi, pertumbuhan, serta produktivitas tanaman. Secara umum, peningkatan CO₂ dapat meningkatkan laju fotosintesis karena proses ini memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan bahan kering tanaman. Selain itu, peningkatan CO₂ biasanya disertai penurunan laju transpirasi sehingga efisiensi penggunaan air meningkat dan tanaman lebih toleran terhadap kondisi kekeringan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengayaan CO₂, khususnya di rumah kaca, berpotensi mempercepat fotosintesis dan meningkatkan hasil panen. Namun demikian, kadar CO₂ yang terlalu tinggi dapat menurunkan kualitas nutrisi pada beberapa tanaman, sehingga pengelolaannya perlu dilakukan secara optimal agar manfaatnya tetap maksimal (Sutoyo, 2011).

Fotosintesis merupakan proses dalam pembuatan makanan bagi tumbuhan untuk sumber makanannya sendiri serta pembuatan oksigen yang digunakan manusia untuk kelangsungan hidup manusia. Fotosintesis suatu proses biologi yang

menggunakan energi dan cahaya matahari dengan dipengaruhi faktor lain seperti air (H_2O), karbon dioksida (CO_2), suhu, umur daun, karbohidrat. Cahaya matahari merupakan sumber energi utama bagi reaksi fotosintesis, dengan penyerapan cahaya oleh daun dapat menghasilkan perubahan morfologi dan fisiologi berbeda. Secara garis besar, fotosintesis terdiri dari dua tahap utama, yaitu reaksi terang dan reaksi gelap. Pada tahap reaksi terang, energi cahaya dimanfaatkan untuk menguraikan molekul air menjadi oksigen, proton, dan elektron, yang kemudian menghasilkan ATP serta NADPH sebagai sumber energi. Sementara itu, dalam reaksi gelap atau siklus Calvin, ATP dan NADPH digunakan untuk mengonversi karbon dioksida menjadi glukosa melalui serangkaian proses enzimatik (Maftukhah dkk., 2023).

Proses fotosintesis menjadi dasar dalam memahami respons tanaman pangan, termasuk kedelai, terhadap perubahan lingkungan. Kedelai (*Glycine max* L.) merupakan komoditas pangan penting di Indonesia sebagai sumber protein dan pendukung ketahanan pangan nasional. Kedelai dimanfaatkan dalam berbagai produk olahan seperti tempe, tahu, susu kedelai, minyak, tepung, pakan ternak, serta bahan baku industri. Tanaman kedelai termasuk tanaman semusim yang tumbuh tegak, berakar dengan kemampuan bersimbiosis bersama bakteri *Rhizobium* untuk mengikat nitrogen dari udara. Kedelai memiliki daun trifoliat, bunga berwarna ungu atau putih, mampu menyerbuk sendiri, serta polong berisi 1–5 biji. Pertumbuhan optimal terjadi pada suhu 25–27 °C, lama penyinaran 10–12 jam per hari, curah hujan 100–200 mm per bulan, dan kelembapan sekitar 50% (Andika, 2020).

Pada umumnya, tanaman C3 mengalami peningkatan laju fotosintesis dan pertumbuhan biomassa saat terpapar konsentrasi CO_2 yang lebih tinggi (Taufiq, 2012). Namun, respons positif ini dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan lainnya, seperti suhu. Sionit *et al.* (1987) menemukan bahwa peningkatan konsentrasi CO_2 pada suhu rendah dapat meningkatkan pertumbuhan kedelai. Namun, setiap kenaikan suhu sebesar 1°C dapat menurunkan hasil kedelai hingga 17%. Penelitian lain oleh Kanemoto *et al.* (2009) menunjukkan bahwa fotosintesis daun kedelai menurun secara substansial ketika konsentrasi CO_2

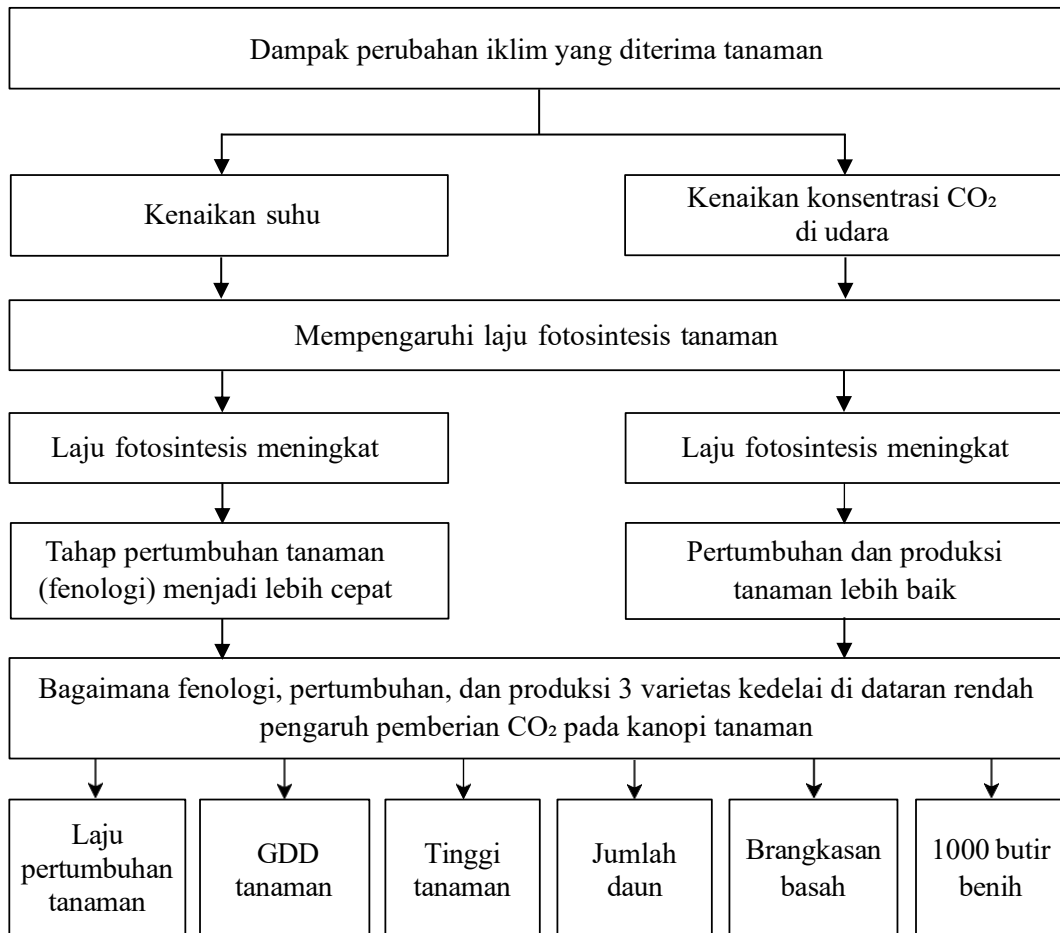
meningkat dari sekitar 400 ppm menjadi 1000 ppm selama 27 hari perlakuan. Selain itu, Soleh dan Kokubun (2018) melaporkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu menyebabkan penurunan laju pembukaan stomata serta berat kering tanaman kedelai. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun peningkatan CO₂ dapat meningkatkan fotosintesis pada tahap awal, namun pada tahap lanjut dapat terjadi mekanisme *downregulation* yang menurunkan efisiensi fotosintesis. Secara keseluruhan, meskipun peningkatan CO₂ dapat memberikan manfaat bagi pertumbuhan kedelai, interaksi dengan faktor lingkungan lain seperti suhu perlu diperhatikan untuk memastikan hasil yang optimal.

Dalam teori fenologi, suhu memiliki peran penting dalam menentukan kecepatan perkembangan tanaman. Suhu yang lebih tinggi, selama masih berada dalam kisaran optimum, dapat mempercepat proses fisiologis tanaman sehingga perubahan fase pertumbuhan lebih cepat. Timotiwu *et al.* (2021) menjelaskan bahwa respons tanaman terhadap perubahan suhu dapat diamati melalui fenologi dan dihitung menggunakan *Growing Degree Days* (GDD). Pada kondisi suhu lebih tinggi, akumulasi GDD tercapai dalam waktu yang lebih singkat, sehingga tanaman lebih cepat memasuki fase pertumbuhan berikutnya. Dengan demikian, suhu yang meningkat dapat menyebabkan tanaman tampak tumbuh lebih cepat secara fisiologis.

Sejalan dengan fenomena perubahan iklim yang ditandai oleh peningkatan suhu udara, pemahaman mengenai dampaknya terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman menjadi sangat penting. Salah satu cara untuk mengamati respons tanaman terhadap perubahan iklim adalah melalui kajian fenologi, yaitu mengenai waktu terjadinya berbagai tahap pertumbuhan tanaman, seperti durasi menuju fase pembungaan yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan mencakup fase vegetatif hingga pembungaan. Dalam bidang pertanian, pemahaman fenologi berperan penting dalam menentukan waktu tanam yang optimal, strategi pemupukan, serta pengendalian hama dan penyakit (Aryani dkk., 2023).

1.5 Kerangka Pemikiran

Adapun kerangka pemikiran dalam penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 1. Kerangka pemikiran.

Perubahan iklim adalah masalah global yang terjadi karena peningkatan suhu bumi dan konsentrasi gas rumah kaca, sehingga menyebabkan perubahan pola cuaca di berbagai wilayah. Tanaman kedelai (*Glycine max* L.) merupakan salah satu tanaman pangan yang pertumbuhannya sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti suhu, curah hujan, dan konsentrasi karbon dioksida (CO₂). Peningkatan suhu dan konsentrasi CO₂ di atmosfer dapat memengaruhi berbagai aspek fisiologis tanaman, termasuk laju fotosintesis. Namun, kenaikan suhu

global yang berlebihan juga dapat menimbulkan stres termal pada tanaman, yang berdampak negatif terhadap pertumbuhan dan produktivitasnya.

Peningkatan konsentrasi CO₂ dapat merangsang laju fotosintesis karena tanaman memiliki kapasitas lebih besar untuk menyerap karbon, yang pada akhirnya dapat mempercepat pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Laju fotosintesis yang lebih tinggi ini memiliki kaitan erat dengan percepatan fase-fase pertumbuhan atau fenologi tanaman. Pada tanaman kedelai, kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya pergeseran fase pertumbuhan, yang berpengaruh pada perubahan dalam waktu tanam, durasi fase vegetatif dan generatif, serta hasil produksi. Fenologi tanaman merupakan fase yang mencakup waktu dan tahapan pertumbuhan, mulai dari pembungaan hingga pematangan. Tahapan ini dapat dianalisis menggunakan metode yang dikenal sebagai *Growing Degree Days* (GDD), yaitu dengan menghitung akumulasi suhu harian dan membandingkannya dengan suhu dasar yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Melalui metode tersebut, waktu yang tepat untuk berbagai fase fenologis tanaman dapat diperkirakan secara lebih akurat, sehingga dapat membantu dalam pengelolaan budidaya yang lebih efisien.

Berdasarkan teori pertumbuhan dan perkembangan tanaman, respons tanaman terhadap kondisi lingkungan dapat diamati melalui perubahan pertumbuhan vegetatif, perkembangan fenologi, serta komponen hasil. Menurut teori pertumbuhan tanaman, pertumbuhan merupakan proses bertambahnya ukuran dan biomassa tanaman yang terjadi secara permanen sebagai hasil pembelahan dan pembesaran sel. Karena proses tersebut tidak dapat diamati secara langsung, maka pertumbuhan tanaman dinilai melalui beberapa indikator yang mudah diukur. Tinggi tanaman dan jumlah daun digunakan untuk menggambarkan pertumbuhan vegetatif tanaman. Laju pertumbuhan digunakan untuk menunjukkan kecepatan tanaman dalam menambah biomassa. Brangkasan segar dan brangkasan kering mencerminkan akumulasi biomassa tanaman sebagai hasil dari proses fotosintesis. Selain itu, *Growing Degree Days* (GDD) digunakan untuk menjelaskan perkembangan tanaman berdasarkan akumulasi suhu, sedangkan bobot 1000 butir benih digunakan sebagai indikator hasil yang menunjukkan keberhasilan pengisian biji.

Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk dilakukan sebagai upaya menghadapi dampak perubahan iklim terhadap pertumbuhan tanaman kedelai. Melalui penelitian ini, dapat diketahui bagaimana pengaruh peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer terhadap pertumbuhan tanaman kedelai, mulai dari fase perkecambahan hingga masa panen. Data yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang bermanfaat mengenai apakah peningkatan CO₂ memberikan dampak positif, negatif, atau bahkan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman kedelai.

1.6 Hipotesis

Berdasarkan kerangka pemikiran yang telah dipaparkan, hipotesis yang dapat diajukan adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan konsentrasi CO₂ di atas kanopi tanaman diduga memengaruhi pertumbuhan, produksi dan fenologi ketiga varietas kedelai.
2. Varietas yang berbeda akan memberikan tanggapan yang berbeda terhadap peningkatan konsentrasi CO₂ di atas kanopi tanaman.
3. Terdapat interaksi antara peningkatan konsentrasi CO₂ dan varietas kedelai terhadap fenologi, pertumbuhan, dan produksi tanaman kedelai.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perubahan Iklim dan Pemanasan Global

Pemanasan global adalah fenomena peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan bumi yang disebabkan oleh meningkatnya emisi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO₂). Gas ini memerangkap panas matahari, menyebabkan suhu bumi meningkat dan mengganggu berbagai parameter iklim. Akibatnya, terjadi perubahan iklim yang signifikan, termasuk perubahan pola cuaca, peningkatan intensitas curah hujan yang berpotensi memicu banjir dan tanah longsor, serta musim kering yang berkepanjangan di beberapa wilayah. Dampak ini mengancam kehidupan manusia, memengaruhi kesehatan, pertanian, infrastruktur, dan sektor lainnya. Perubahan pola curah hujan akibat pemanasan global telah berdampak pada sektor pertanian, menyebabkan ketidakpastian dalam hasil panen dan meningkatkan risiko kerawanan pangan di banyak negara. Frekuensi bencana alam, seperti badai tropis dan gelombang panas terus meningkat sebagai dampak langsung dari perubahan iklim yang disebabkan oleh pemanasan global. Oleh karena itu, diperlukan langkah mitigasi, seperti pengurangan emisi gas rumah kaca dan pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan, untuk mengurangi dampak negatif perubahan iklim di masa mendatang (Samidjo dan Suharso, 2017).

Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer, yang sebagian besar disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar fosil dan deforestasi, memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan dan sektor pertanian. Sektor pertanian menyumbang sekitar 7% terhadap total emisi gas rumah kaca di Indonesia pada tahun 2000, sementara secara global kontribusinya mencapai 14%. Selain itu, pada tahun 2012, emisi gas rumah kaca yang berasal dari sektor pertanian di

Indonesia mengalami kenaikan menjadi 7,8% dari total emisi nasional (Rozci, 2023). Peningkatan kadar CO₂ dapat mempercepat pemanasan global yang berujung pada perubahan iklim. Perubahan iklim dapat menurunkan produktivitas tanaman akibat kekeringan atau serangan hama yang lebih intensif. Perubahan suhu dan pola curah hujan juga dapat mengganggu siklus pertumbuhan tanaman, mengurangi hasil panen, serta mengancam ketahanan pangan dunia. Selain itu, kegiatan pertanian, seperti pembukaan lahan gambut, turut berkontribusi terhadap peningkatan emisi CO₂ yang dapat memperburuk kondisi lingkungan dan mempercepat perubahan iklim (Jamaludin dkk., 2020).

2.2 Klasifikasi dan Morfologi Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.)

2.2.1 Klasifikasi Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.)

Kedelai (*Glycine max* L.) adalah salah satu komoditas penting yang berfungsi sebagai sumber pangan, pakan, dan bahan baku industri. Kebutuhan kedelai di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan pertambahan jumlah penduduk, yang mengharuskan adanya peningkatan pasokan kedelai. Menurut perkiraan Kementerian Pertanian, impor kedelai pada tahun 2021 diperkirakan mencapai 2,6 juta ton (Umarie dkk., 2021). Sementara itu, data dari Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2023 menunjukkan bahwa produksi kedelai nasional hanya mencapai 555.000 ton, sedangkan permintaan dalam negeri mencapai 2,7 juta ton (Swastika, 2015). Kedelai (*Glycine max* L.) merupakan jenis tanaman kacang-kacangan dari famili Leguminosae yang dijadikan sebagai bahan makanan tambahan karena memiliki kandungan protein yang tinggi (Arwin, 2022).

Tanaman kedelai dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

Kingdom	: Plantae
Divisi	: Spermatophyta
Sub Divisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledoneae

Ordo : Rosales
 Famili : Leguminoceae
 Sub-Famili : Papilionacea
 Genus : *Glycine*
 Spesies : *Glycine max* (L.) Meill (Arwin, 2022).

2.2.2 Morfologi Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.)

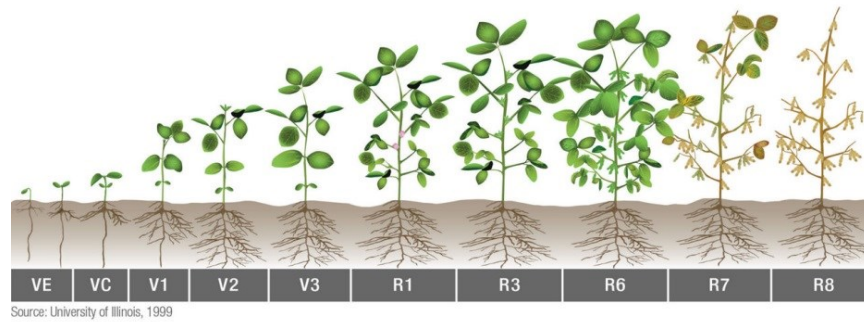
Kedelai (*Glycine max* L.) memiliki sistem perakaran yang terdiri dari akar tunggang dan akar sekunder yang tumbuh dari akar tunggang. Akar tunggang merupakan perkembangan dari akar radikal yang muncul sejak masa perkecambahan. Pada kondisi optimal, akar tunggang kedelai dapat tumbuh hingga kedalaman 2 meter. Perkembangan akar dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti persiapan lahan, tekstur tanah, kondisi fisik dan kimia tanah, serta kadar air tanah. Selain itu, terdapat interaksi simbiosis antara bakteri nodul akar (*Rhizobium japonicum*) dengan akar tanaman kedelai, yang menyebabkan terbentuknya bintil akar. Bintil akar berperan penting dalam proses fiksasi nitrogen yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman kedelai (Adisarwanto, 2013).

Batang tanaman kedelai memiliki sifat yang tidak berkayu dan berbentuk silindris. Tinggi batang dapat bervariasi antara 30 hingga 100 cm, dengan jumlah ruas berkisar antara 15 hingga 20 buah. Batang kedelai memiliki dua jenis pola pertumbuhan, yaitu tipe determinate dan indeterminate. Pada tipe determinate, pertumbuhan batang berhenti ketika tanaman mulai berbunga, sedangkan pada tipe indeterminate, batang terus tumbuh meskipun tanaman sudah memasuki fase berbunga. Sedangkan, daun pada tanaman kedelai memiliki daun majemuk trifoliolate atau memiliki 3 daun setiap tangkainya. Bentuk daun umumnya oval dan lonjong dengan ujung yang runcing dan tepi yang rata, dengan warna dari hijau muda hingga hijau tua. Daun berperan penting dalam proses fotosintesis untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman kedelai (Lagiman dkk., 2022).

Tanaman kedelai (*Glycine max*) biasanya mulai berbunga pada usia 5 hingga 7 minggu setelah tanam. Proses penyerbukannya umumnya bersifat autogami atau menyerbuk sendiri, dengan karakteristik kembang yang bersifat kleistogami. Bunganya memiliki bentuk mirip kupu-kupu dan bervariasi dalam warna, mulai dari putih hingga ungu, tergantung pada varietasnya. Dalam satu tanaman, dapat ditemukan hingga 25 bunga yang tersebar di berbagai cabang. Tanaman kedelai menghasilkan biji berbentuk polong, dengan tiap polong berisi 1-4 biji. Biji kedelai berkeping dua, terbungkus kulit biji, dan embrio terletak di antara keping biji. Polong mulai muncul 10-14 hari setelah bunga pertama, awalnya berwarna hijau dan berubah menjadi kuning atau cokelat saat matang. Setiap ketiak daun dapat menghasilkan 2-10 polong, dengan total 20-200 polong per tanaman tergantung varietas dan kondisi lingkungan (Lagiman dkk., 2022).

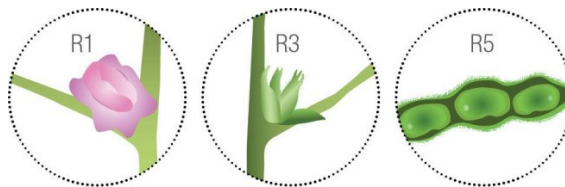
2.2.3 Fase Pertumbuhan Tanaman Kedelai

Tanaman kedelai, seperti halnya tanaman lain, mengalami dua fase pertumbuhan utama, yaitu fase vegetatif dan generatif. Fase vegetatif ditandai dengan simbol V, sedangkan fase generatif ditandai dengan simbol R. Fase vegetatif merupakan tahap awal di mana tanaman mulai tumbuh dengan membentuk akar, batang, dan daun. Pertumbuhan diawali dari munculnya benih, kemudian disusul dengan perkembangan daun pertama, dan sistem perakaran meluas agar mampu menyerap air dan unsur hara secara optimal. Selanjutnya, memulai fase generatif (reproduksi) di mana bunga, polong, dan biji mulai terbentuk. Pada tahap ini, tanaman menjadi lebih sensitif terhadap kondisi lingkungan, seperti kekurangan air atau nutrisi, yang dapat berdampak pada hasil panen baik dari segi jumlah maupun kualitas (Adie dan Krisnawati, 2013).



Gambar 2. Tahap pertumbuhan tanaman kedelai.
(Sumber: Crop Science, United States 2024).

Sebagian besar varietas kedelai memiliki dua tipe pola pertumbuhan, yaitu pertumbuhan yang tidak menentu dan yang menentu. Pada tipe tidak menentu, tanaman masih terus tumbuh secara vegetatif meskipun sudah mulai berbunga, dan kecepatan pertumbuhannya sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Sementara itu, pada tipe pertumbuhan yang menentu, pertumbuhan vertikal tanaman biasanya berhenti begitu fase pembungaan selesai.



Gambar 3. Tahapan pertumbuhan reproduksi kedelai.
(Sumber: Crop Science, United States 2024).

2.2.3.1 Pertumbuhan Vegetatif (V)

Fase vegetatif (V) dimulai saat tanaman kedelai muncul dari tanah dan kotiledon belum membuka (Ve) (Tabel 1). Ketika kotiledon dan daun di atasnya mulai terbuka maka fase tersebut merupakan fase kotiledon (Vc). Buku kesatu atau V1 ditandai dengan daun tunggal pada buku pertama telah berkembang penuh dan daun bertangkai tiga (trifoliat) pada buku di atasnya terbuka. Pada fase V2, tanaman kedelai ditandai dengan terbukanya daun bertiga kedua secara penuh, yaitu daun yang tumbuh tepat di atas daun bertiga pertama. Posisi daun bertiga

kedua ini disebut sebagai buku pertama, sedangkan daun bertiga pertama yang berada di bawahnya secara otomatis dianggap sebagai buku kedua. Terbukanya daun bertiga ini berlanjut sampai fase V4, kemudian Ketika daun bertangkai tiga pada buku ke n telah berkembang penuh maka sudah masuk fase Vn (Adie dan Krisnawati, 2013).

Tabel 1. Fase pertumbuhan vegetatif tanaman kedelai

Sandi Fase	Fase Pertumbuhan	Keterangan
Ve	Kecambah	Tanaman muncul di atas tanah
Vc	Kotiledon	Keping daun (kotiledon) dan daun tunggal di atasnya mulai terbuka
V1	Buku pertama	Daun tunggal buku pertama sudah berkembang sempurna, dan daun bertangkai tiga pada buku di atasnya mulai terbuka.
V2	Buku kedua	Daun bertangkai tiga telah berkembang sempurna, dan daun pada buku ketiga sudah mulai membuka.
V3	Buku ketiga	Daun bertangkai tiga telah tumbuh dengan sempurna, dan daun pada buku keempat telah terbuka.
V4	Buku keempat	Daun bertangkai tiga telah tumbuh penuh, dan daun buku kelima sudah mulai terbuka.
Vn	Buku ke n	Daun bertangkai tiga pada buku ke n telah berkembang sempurna.

Sumber: Adie dan Krisnawati (2013).

2.2.3.2 Pertumbuhan Generatif dan Reproduksi (R)

Pada fase reproduktif (R) terdapat tiga fase yaitu, pembungaan, pembentukan polong, dan pematangan biji. Fase R1 ditandai dengan mekarnya satu bunga

dalam satu tanaman pada batang utama, namun ketika bunga telah mekar lebih dari satu maka memasuki fase R2. Fase pembentukan polong (R3) ditandai dengan muncul polong berukuran 5 mm, sedangkan pematangan biji ditandai dengan batang utama berisi biji berukuran 2 mm x 1 mm (Gambar 4).

Tabel 2. Fase pertumbuhan generatif atau reproduktif pada tanaman kedelai

Sandi Fase	Fase Pertumbuhan	Keterangan
R1	Muncul berbunga	Terdapat satu bunga mekar pada batang utama
R2	Berbunga penuh	Terdapat bunga mekar pada dua atau lebih buku batang utama
R3	Pembentukan polong	Dalam batang utama terdapat satu atau lebih polong sepanjang 5.
R4	Polong berkembang penuh	Polong batang utama mencapai 2 cm
R5	Polong mulai berisi	Polong pada batang utama terisi biji dengan ukuran 2 mm x 1 mm
R6	Biji penuh	Polong terisi biji berwarna hijau, dan ukuran bijinya telah mencapai titik maksimum, memenuhi seluruh ruang dalam polong.
R7	Polong berwarna kuning, coklat, dan matang	Satu polong pada batang utama menunjukkan warna matang (abu atau kehitaman)
R8	Polong matang penuh	95% matang (kuning kecoklatan atau kehitaman)

Sumber: Adie dan Krisnawati (2013).

2.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Kedelai

Perubahan iklim memiliki dampak signifikan terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman secara umum. Peningkatan suhu global dapat menghambat proses fotosintesis dan respirasi tanaman, yang berpotensi menurunkan hasil panen. Selain itu, perubahan pola curah hujan meningkatkan risiko kekeringan atau banjir, yang dapat merusak tanaman dan mengurangi produktivitas lahan pertanian (Sulaminingsih dkk., 2024). Curah hujan merupakan faktor iklim yang memiliki peran penting dalam menjaga ketersediaan air, terutama pada lahan tadah hujan dan lahan kering. Jika curah hujan melebihi ambang batas, volume air di permukaan tanah akan meningkat, yang dapat berdampak pada pertumbuhan tanaman. Curah hujan yang terlalu tinggi dapat menghambat produktivitas tanaman, sehingga proses pertumbuhannya menjadi terganggu. Pertumbuhan dan perkembangan tanaman sangat dipengaruhi oleh faktor iklim, seperti suhu udara. Suhu udara berperan dalam mengatur berbagai aktivitas kehidupan tanaman, seperti fotosintesis, respirasi, transpirasi, pertumbuhan, penyerbukan, pembuahan, dan gugurnya buah. Besar kecilnya pengaruh suhu terhadap tanaman tergantung pada faktor lain, seperti kelembapan, ketersediaan air, dan jenis tanaman yang dibudidayakan (Herlina dan Prasetyorini, 2020).

2.4 Teori Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses yang penting bagi tanaman untuk mengubah energi matahari menjadi energi yang dapat digunakan untuk tumbuh. Terdapat tiga jenis fotosintesis pada tanaman: C3, C4, dan CAM. Fotosintesis tipe C3 adalah jalur fotosintesis yang paling umum ditemukan pada tanaman, termasuk kedelai. Pada jalur ini, karbon dioksida (CO_2) diikat langsung oleh enzim RuBisCO untuk membentuk senyawa tiga karbon. Namun, proses ini rentan terhadap fotorespirasi, terutama pada kondisi suhu tinggi dan konsentrasi CO_2 rendah, yang dapat mengurangi efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan tanaman. Tanaman dengan jalur fotosintesis C4, seperti jagung dan tebu, memiliki mekanisme yang lebih efisien dalam mengikat CO_2 , terutama pada kondisi panas dan kering.

Karbon dioksida (CO_2) diubah menjadi senyawa empat karbon sebelum memasuki siklus Calvin, yang mengurangi risiko fotorespirasi dan meningkatkan efisiensi fotosintesis. Sedangkan, fotosintesis tipe CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*) ditemukan pada tanaman seperti kaktus dan anggrek. Stomata akan membuka pada malam hari untuk mengikat CO_2 dan disimpan sebagai asam organik, kemudian digunakan untuk fotosintesis pada siang hari. Strategi ini memungkinkan tanaman CAM bertahan di lingkungan dengan ketersediaan air yang terbatas.

2.5 Pengaruh Peningkatan CO_2 Terhadap Fotosintesis Tanaman Kedelai (*Glycine max* L.)

Karbon dioksida (CO_2) memiliki peran penting dalam proses fotosintesis, yaitu dalam konversi energi cahaya menjadi energi kimia dalam tanaman berbentuk karbohidrat. Selama fotosintesis, tanaman menyerap CO_2 dari atmosfer melalui stomata pada daun. Karbon dioksida (CO_2) kemudian digunakan dalam siklus Calvin untuk menghasilkan glukosa, yang berfungsi sebagai sumber energi dan bahan baku bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Selain itu, secara teori peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer dapat meningkatkan laju fotosintesis pada tanaman, terutama pada tanaman dengan tipe C_3 , seperti padi dan kedelai. Namun, efek ini dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti ketersediaan air, suhu, dan nutrisi. Oleh karena itu, meskipun peningkatan CO_2 dapat merangsang fotosintesis, faktor lingkungan lainnya tetap berperan penting dalam menentukan produktivitas tanaman. Efek langsung dari peningkatan kadar CO_2 pada proses fotosintesis tanaman C_3 adalah peningkatan efisiensi penggunaan air. Pada tanaman C_4 dan C_3 , peningkatan CO_2 mengurangi pembukaan stomata, yang mengurangi penguapan air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air. Peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO_2) dapat memengaruhi struktur daun dan kanopi tanaman. Perubahan struktur kanopi dapat memengaruhi efisiensi penyerapan cahaya dan distribusi sumber daya dalam tanaman (Sutoyo, 2011).

Kedelai (*Glycine max* L.) memiliki peran penting dalam sektor pangan dan pertanian sebagai sumber utama protein nabati dan minyak nabati. Dalam industri pangan, kedelai diolah menjadi produk seperti tahu, tempe, susu kedelai, dan minyak kedelai, yang menjadi komponen penting dalam pemenuhan gizi masyarakat. Kandungan proteinnya yang tinggi menjadikannya alternatif bagi protein hewani, mendukung kebutuhan gizi yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan. Di sektor pertanian, kedelai berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah melalui kemampuan fiksasi nitrogen dengan bantuan bakteri *Rhizobium*, sehingga mendukung sistem rotasi tanaman yang berkelanjutan. Selain itu, kedelai merupakan komoditas utama dalam perdagangan global, memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian petani dan industri agribisnis (Hartman *et al.*, 2011).

Tanaman kedelai (*Glycine max* L.) memberikan respons berbeda terhadap perubahan suhu, kelembapan, dan konsentrasi CO₂. Suhu optimal bervariasi sesuai fase pertumbuhan, mulai dari 15–25°C, dengan suhu di atas 35°C berpotensi menurunkan hasil panen hingga 17% per kenaikan 1°C. Kelembapan tanah ideal berkisar antara 70–85% kapasitas lapangan, dengan kebutuhan air yang lebih tinggi selama fase generatif. Peningkatan konsentrasi CO₂ hingga 700 ppm diketahui dapat meningkatkan fotosintesis, efisiensi penggunaan air, dan mengurangi transpirasi (Taufiq dan Sundari, 2012). Peningkatan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di atmosfer memiliki dampak yang kompleks terhadap tanaman kedelai. Pada fase awal pertumbuhan, peningkatan CO₂ dapat meningkatkan laju fotosintesis, yang berpotensi meningkatkan pertumbuhan tanaman. Namun, pada fase pembungaan, konsentrasi CO₂ yang tinggi dapat menurunkan laju fotosintesis, yang dapat berdampak negatif pada hasil panen. Peningkatan CO₂ yang disertai dengan kenaikan suhu dapat menyebabkan penurunan laju pembukaan stomata dan berat kering tanaman kedelai, yang menunjukkan bahwa kondisi ini dapat mengurangi efisiensi fotosintesis dan akumulasi biomassa (Soleh dan Kokubun, 2018).

2.6 Fenologi Tanaman

Fenologi merupakan cabang ilmu yang mengkaji tahapan-tahapan perkembangan tanaman, termasuk pembentukan daun, pembungaan, dan pembuahan.

Perkembangan ini dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti intensitas cahaya, suhu, dan kelembapan udara. Salah satu fase penting dalam fenologi adalah fase pembungaan, yang menandai awal dari proses reproduksi tumbuhan. Fase ini kemudian berlanjut ke tahap pembuahan, yaitu periode sejak awal perkembangan buah hingga mencapai kematangan. Studi mengenai fenologi menjadi penting dalam bidang pertanian dan ekologi karena dapat membantu memahami respons tumbuhan terhadap perubahan lingkungan. Fenologi di bidang pertanian dapat menghubungkan varietas dengan waktu tanam, panen, dan produktivitasnya (Rizkyma dkk., 2023).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli – Oktober 2025 di Laboratorium Lapang Terpadu, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini antara lain data logger tipe GM 1365, polybag, meteran, timbangan digital, botol plastik, spidol, alat tulis, kamera digital, CO₂ detektor, dan sungkup. Sedangkan, bahan yang digunakan adalah benih kedelai (*Glycine max* L.) dengan 3 varietas yaitu, Dena 1, Deja 1, dan Grobogan, media tanam, serta alat bahan dalam pembuatan gas CO₂ yaitu botol bekas 1,5 L, air hangat, gula putih, ragi, dan baking soda.

3.3 Metode Penelitian

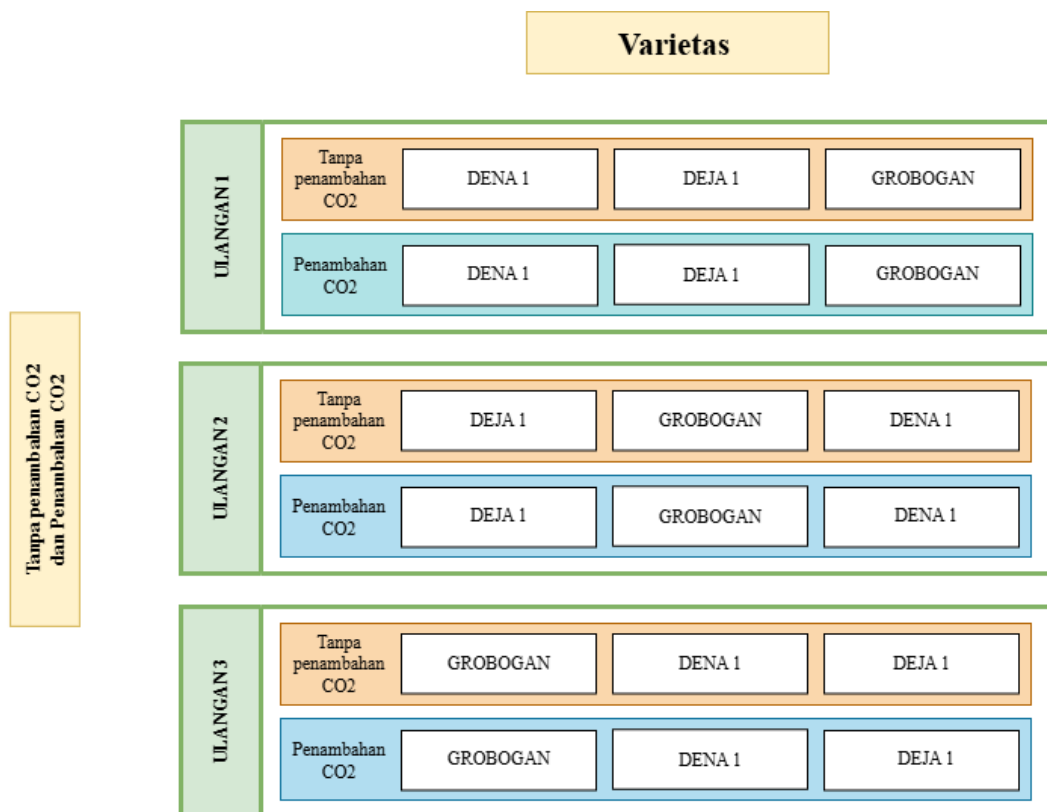
Penelitian ini menggunakan Strip Plot dalam Rancangan Acak Kelompok (RAK) dengan dua faktor perlakuan. Perlakuan terdiri atas dua faktor, yaitu CO₂ dengan dua taraf (-CO₂ dan +CO₂) serta varietas kedelai dengan tiga taraf (Dena 1, Deja 1, dan Grobogan). Setiap kombinasi perlakuan diulang tiga kali sehingga diperoleh 18 satuan percobaan dengan total 72 tanaman. Analisis data dilakukan dengan diuji homogenitas ragam menggunakan uji Bartlett. Apabila hasil analisis ragam menunjukkan pengaruh nyata, maka dilakukan uji lanjut Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf nyata 5%. Seluruh analisis data dilakukan menggunakan software R Studio.

Model linier yang digunakan adalah:

$$Y_{\{ijk\}} = \mu + K_k + A_i + \delta_{\{ik\}} + B_j + \delta_{\{jk\}} + (AB)_{\{ij\}} + \varepsilon_{\{ijk\}}$$

3.4 Petak Percobaan

Berikut petak percobaan yang diterapkan pada penelitian tanaman kedelai:



Gambar 4. Petak percobaan.

3.5 Pelaksanaan Penelitian

3.5.1 Persiapan Media Tanam

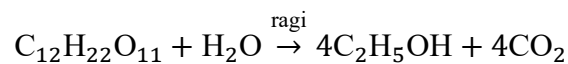
Media tanam yang akan digunakan untuk menanam kedelai adalah tanah yang dimasukkan ke dalam polybag berukuran 30 x 30 cm yang telah disiapkan

sebanyak 72 polybag. Polybag diisi dengan tanah yang telah disaring, dengan rata-rata berat media tanam 5-7 kg.

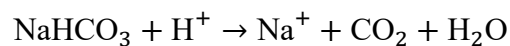
3.5.2 Pembuatan Karbon Dioksida (CO₂)

Gas karbon dioksida (CO₂) pada penelitian ini dihasilkan secara manual melalui fermentasi anaerob menggunakan campuran ragi (*Saccharomyces cerevisiae*), gula putih (sukrosa), baking soda (NaHCO₃), dan air hangat. Komposisi bahan yang digunakan terdiri atas 0,8140 g ragi, 1,3200 g gula putih, 0,0080 g baking soda, dan 0,8 L air hangat. Seluruh bahan dicampurkan ke dalam botol plastik berkapasitas 1,5 L, kemudian diaduk hingga homogen. Botol selanjutnya ditempatkan di dalam sungkup untuk memungkinkan gas CO₂ terakumulasi di sekitar tanaman.

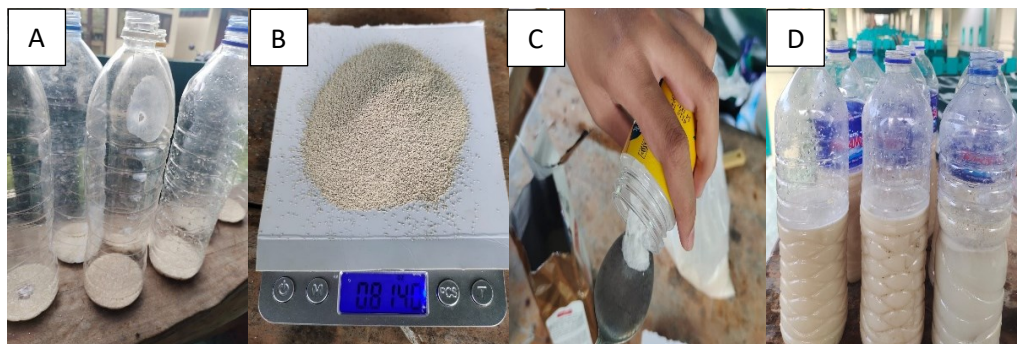
Fermentasi berlangsung melalui dua tahap reaksi utama, yaitu penguraian sukrosa dan fermentasi glukosa oleh enzim ragi, dengan persamaan sebagai berikut:



Selain itu, sebagian CO₂ juga dihasilkan dari reaksi antara baking soda dan asam organik hasil fermentasi:



Dengan demikian, gas CO₂ yang digunakan dalam penelitian berasal dari hasil gabungan fermentasi gula oleh ragi dan reaksi netralisasi baking soda dengan asam hasil fermentasi.



Gambar 5. Proses pembuatan CO₂ (a) gula, (b) ragi, (c) baking soda, (d) botol CO₂

3.5.3 Pengaplikasian Karbon Dioksida (CO₂)

Pengaplikasian CO₂ dilaksanakan dengan meletakkan botol yang telah melepas CO₂ pada barisan tanaman kedelai yang mendapat perlakuan penambahan CO₂ yaitu yang ditanam di dalam sungkup. Sedangkan, tanaman tanpa perlakuan CO₂ diletakkan tanpa diberi sungkup.



Gambar 6. Pengaplikasian CO₂ di dalam sungkup.

3.5.4 Penanaman

Benih kedelai diseleksi terlebih dahulu untuk mendapat ukuran dan kualitas yang bagus sebelum ditanam. Kemudian, benih yang telah diseleksi dimasukkan ke dalam polybag yang sudah dilubangi (1 polybag terdiri dari 3 lubang) dan setiap lubang diberi furadan untuk mencegah benih terserang hama.

3.5.5 Pemeliharaan Tanaman

Pemeliharaan tanaman yang dilakukan dalam penelitian ini sebagai berikut:

3.5.5.1 Penyiraman

Penyiraman harus dilakukan secara teratur untuk memastikan tanaman mendapatkan kelembapan yang cukup, terutama pada fase kritis seperti awal

pertumbuhan dan pengisian biji, guna mendukung perkembangan optimal dan hasil panen yang baik.

3.5.5.2 Penyiangan Gulma

Penyiangan secara rutin perlu dilakukan untuk mengurangi persaingan antara tanaman kedelai dan gulma dalam memperoleh nutrisi, air, dan cahaya, sehingga pertumbuhan dan hasil panen tetap optimal.

3.5.6 Pemupukan

Dosis pupuk yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4 kg NPK Mutiara/200 L air. Waktu pengaplikasian dilakukan sebanyak 3 kali, yaitu pada fase daun ke-3/4 (10–15 HST), fase pertumbuhan aktif (30–35 HST), dan fase pembungaan (60–65 HST). Pemupukan dilakukan dengan cara dikocor dan diaplikasikan pada sore hari.

Pemupukan pada masing-masing petak percobaan dilakukan berdasarkan perhitungan berikut:

a) Dosis Pupuk

- Dosis pupuk NPK Mutiara 16-16-16 = 4 kg per 200 L air
- Berdasarkan hasil penelitian Yuriansyah dkk., (2023) dosis optimal pupuk NPK untuk tanaman kedelai berkisar antara 200–300 kg/ha atau setara dengan 20–30 g/m².

Diasumsikan berat tanah lapisan olah tanah 1 ha = 2.000.000 kg (dari volume tanah 10.000 m² x 0,2 m x 1,0 t/m³)

Dosis per kg tanah (g/kg) = 300 kg/2.000.000 kg tanah = 0,00015 kg/kg = 0,15 g/kg

- Dosis pupuk per polybag (g) = 0,15 g/kg x 7 kg = 1,05 g/polybag
- Dosis sekali pakai: 1,05 g x 72 polybag = 75,6 gam
- Dengan dosis 75,6 gam dilarutkan untuk 200 L air, maka jumlah larutan yang diperlukan untuk mencapai 1,05 g/polybag

- Jumlah larutan yang diberikan per polybag= $75,6 \text{ liter} / 72 \text{ polybag} = 1,05 \text{ Liter/polybag}$
- Sehingga aplikasi pemupukan untuk setiap tanaman kedelai dalam polybag ukuran 30x30 cm memerlukan sekitar 1,05 Liter larutan pupuk NPK Mutiara 16:16:16 untuk mencapai dosis yang optimal.

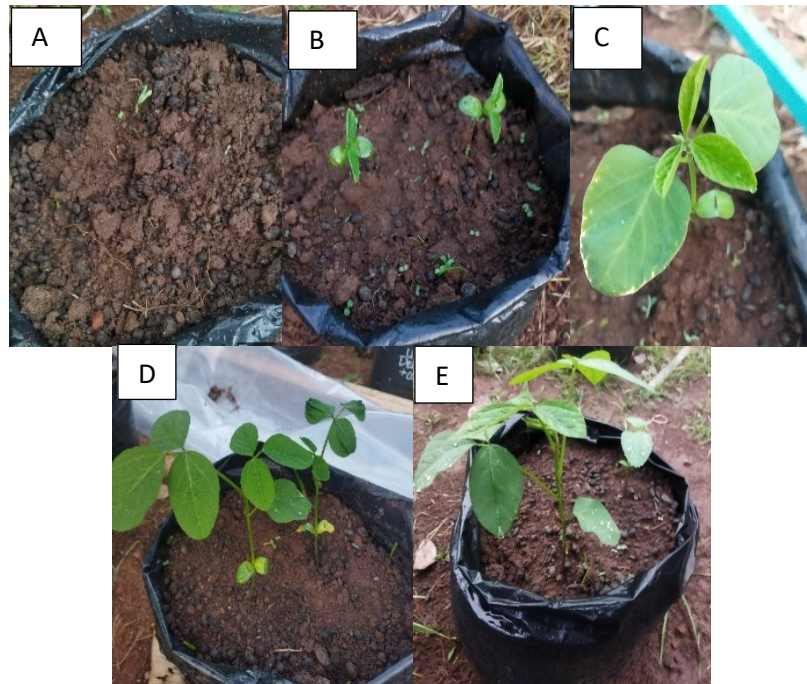
3.5.7 Pemanenan

Pemanenan tanaman kedelai dilakukan pada saat polong 95% telah berwarna coklat atau berwarna kehitaman dan sebagian besar daun kedelai sudah mengalami perontokan. Pemanenan tanaman kedelai dilakukan dengan cara memotong pangkal batang tanaman kedelai. Brangkasan hasil panen kemudian dikeringkan dibawah sinar matahari dan dilakukan pengeringan hingga kadar air mencapai 14%. Dilakukan perontokan setelah brangkasan kedelai kering dengan cara manual dan dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari pecah, retak dan rusaknya biji kedelai.

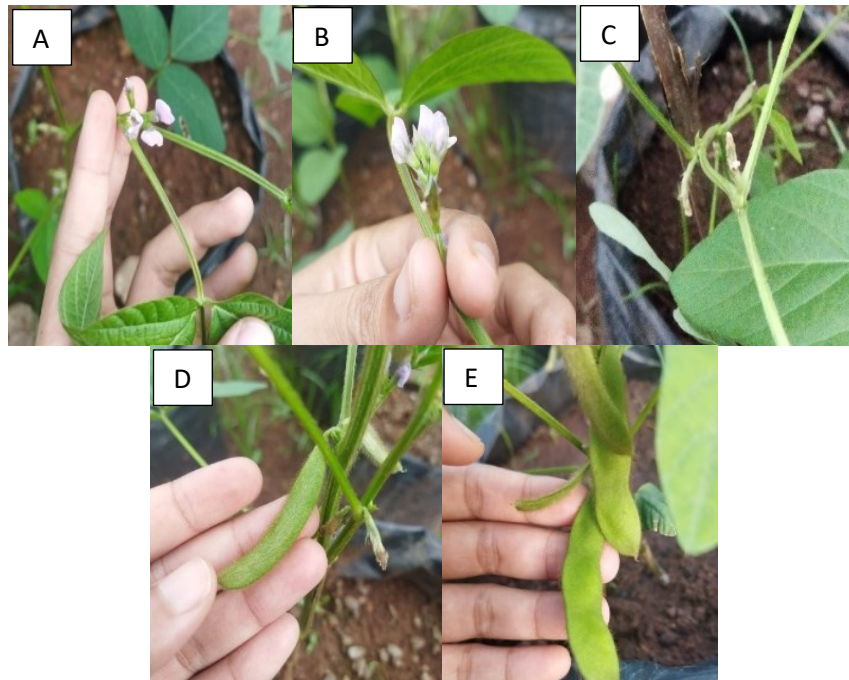
3.6 Variabel Pengamatan

3.6.1 Fenologi Tanaman

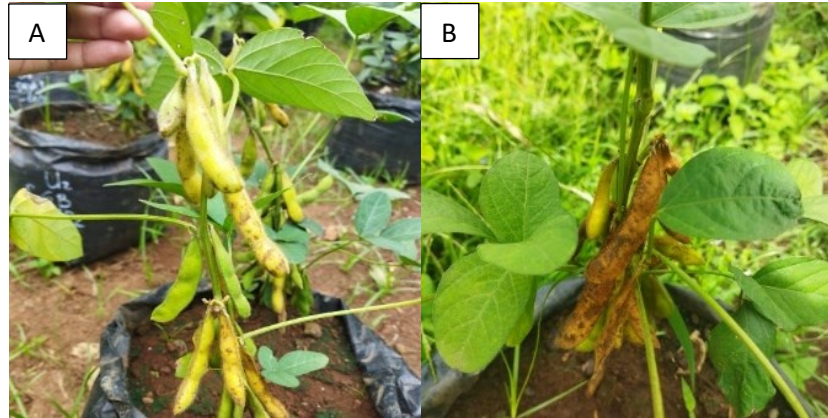
Pengamatan fenologi tanaman dilakukan dengan mengamati waktu perubahan dari fase pertumbuhan tanaman baik dari fase vegetatif maupun generatif. Pengamatan tersebut dilakukan dari proses perkecambahan, muncul bunga, berbunga 50%, berbunga 100%, hingga pembentukan biji tanaman.



Gambar 7. Fase vegetatif tanaman kedelai (a) perkecambahan kedelai, (b) daun pertama membuka penuh, (c) daun trifoliolate, (d) stadia buku ke-2, (e) stadia buku ke-3.



Gambar 8. Fase generatif tanaman kedelai (a) awal muncul bunga, (b) pembungaan penuh, (c) awal pembentukan polong, (d) perkembangan polong, (e) pengisian polong.



Gambar 9. Fase matang fisiologi dan kematangan panen tanaman kedelai
(a) matang fisiologi, (b) kematangan panen.

3.6.2 Tinggi Tanaman (cm)

Pengukuran tinggi tanaman dilakukan ketika tanaman sudah memasuki minggu pertama, kemudian diukur setiap minggu setelah tanam (MST) dengan menggunakan meteran untuk melihat pertumbuhan tanaman. Cara pengukuran dilakukan dari permukaan tanah dekat pangkal batang hingga titik tumbuh tertinggi dari batang utama.

3.6.3 Jumlah Daun (helai)

Pengamatan jumlah daun dilakukan ketika muncul daun *trifoliate* pada fase vegetatif awal. Kemudian, diamati setiap minggu dari daun pertama muncul hingga muncul bunga.

3.6.4 Bobot Segar Brangkasan (gram)

Bobot segar brangkasan digunakan untuk mengukur total biomassa tanaman dalam kondisi segar sebelum mengalami proses pengeringan. Parameter ini mencakup seluruh bagian tanaman, seperti polong, daun, batang, dan akar, yang ditimbang segera setelah panen atau pada tahap pertumbuhan tertentu.

3.6.5 Bobot Kering Brangkasian (gram)

Pengukuran bobot kering brangkasian merupakan metode yang efektif untuk mengevaluasi produktivitas tanaman kedelai. Proses ini melibatkan panen seluruh bagian tanaman, termasuk polong, daun, batang, dan akar, yang kemudian dikeringkan dengan dijemur lalu dioven pada suhu 80°C selama 3 hari

3.6.6 Bobot 1000 Butir (gram)

Variabel pengamatan 1000 butir benih digunakan untuk mengukur bobot rata-rata biji sebagai indikator kualitas dan hasil produksi tanaman. Pengukuran dilakukan dengan menimbang 1000 butir benih yang telah dikeringkan hingga mencapai kadar air standar. Bobot 1000 butir benih yang optimal mencerminkan hasil panen yang baik serta benih yang memiliki potensi tumbuh yang tinggi.

3.6.7 Kadar Air Benih (%)

Penentuan kadar air benih dilakukan melalui pengambilan sampel pada setiap varietas benih kedelai setelah penjemuran awal. Sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 80 °C selama 24 jam. Setelah pengeringan, benih ditimbang menggunakan timbangan analitik dan bobot akhir dicatat sebagai dasar perhitungan kadar air.

3.7 Pengolahan Data

3.7.1 *Growing Degree Days* (GDD)

Growing Degree Days (GDD) adalah metode yang digunakan untuk menghitung akumulasi suhu yang diperlukan bagi pertumbuhan tanaman kedelai. GDD dihitung dengan menjumlahkan selisih antara suhu rata-rata harian dan suhu dasar (biasanya 10° C untuk kedelai) selama periode pertumbuhan. Pengukuran GDD

ini membantu dalam memprediksi fase pertumbuhan tanaman, seperti perkecambahan, pembungaan, dan pematangan, sehingga dapat menentukan waktu yang tepat untuk pemeliharaan dan panen.

Perhitungan GDD dihitung menggunakan rumus:

$$GDD (^{\circ}C) = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

Keterangan:

T_{max} = Suhu maksimum ($^{\circ}C$)

T_{min} = Suhu minimum ($^{\circ}C$)

T_{base} = Suhu dasar ($10^{\circ}C$)

V. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penambahan CO₂ pada kisaran 401–460 ppm belum memberikan pengaruh yang optimal terhadap fenologi, pertumbuhan, maupun produksi tanaman kedelai. Peningkatan konsentrasi CO₂ yang diberikan belum mampu mempercepat perkembangan fenologi, meningkatkan pertumbuhan vegetatif, maupun mendukung pembentukan hasil produksi kedelai secara lebih baik.
2. Ketiga varietas kedelai (Dena 1, Deja 1, dan Grobogan) menunjukkan respons yang relatif seragam terhadap penambahan CO₂ pada variabel fenologi, pertumbuhan, dan produksi. Selain itu, interaksi antara perlakuan penambahan CO₂ dan varietas kedelai tidak memberikan pengaruh nyata terhadap sebagian besar parameter yang diamati, sehingga belum terlihat adanya varietas yang lebih unggul dalam memanfaatkan peningkatan konsentrasi CO₂ pada kondisi penelitian ini.

5.2 Saran

Saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk penelitian yang serupa disarankan untuk menentukan konsentrasi CO₂ yang lebih tinggi dan memakai beberapa konsentrasi, serta memperbaiki kondisi di dalam sungkup seperti cahaya.
2. Perlu dilakukan pengukuran lingkungan yang lebih lengkap seperti intensitas cahaya yang masuk, suhu dalam sungkup, serta kelembapan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adie, M. M. dan Ayda, K. 2013. Keragaan hasil dan komponen hasil biji kedelai pada berbagai agroekologi. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian Tanaman Aneka Kacang dan Umbi*. Hal. 7–17.
- Admaja, W. K., Nasirudin, dan Sriwinarno, H. 2018. Identifikasi dan analisis jejak karbon (carbon footprint) dari penggunaan listrik di Institut Teknologi Yogyakarta. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 18(2): 1–10.
- Ainsworth, E. A. and Rogers, A. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO₂: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment*, 30: 258–270.
- Amthor, J.S. 2000. The McCree–de Wit–Penning de Vries–Thornley respiration paradigms: 30 years later. *Annals of Botany*, 86(1): 1–20.
- Andika, P. 2020. Pertumbuhan dan hasil kedelai (*Glycine max* L.) pada sistem penanaman dan jarak tanam yang berbeda. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Riau.
- Apriyana, Y., Susanti, E., Suciantini, Ramadhani, F., dan Surmaini, E. 2016. Analisis dampak perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan pada lahan kering dan rancang bangun sistem informasinya. *Jurnal Informatika Pertanian*, 25(1): 69–80.
- Arwin, M. 2022. Pertumbuhan dan produksi tanaman kedelai (*Glycine max* (L.) Merrill) yang diaplikasikan pupuk kompos dan pupuk hayati. *Skripsi*. Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Aryani, N., Tumiar, K. M., Paul, B. T., dan Agustiansyah. 2023. Laju pertumbuhan, fase fenologis, dan produksi tanaman stroberi (*Fragaria* spp.) di dataran rendah dengan perlakuan pupuk NPK: Kajian adaptasi tanaman terhadap perubahan iklim. *Jurnal Agrotek Tropika*, 11(3): 429–435.

- Balai Pengujian Standar Instrumen Tanaman Aneka Kacang. 2024. *Deskripsi varietas unggul kedelai 1918–2022*. Pusat Standardisasi Instrumen Tanaman Pangan, Badan Standardisasi Instrumen Pertanian. Bogor.
- Bernacchi, C. J., Kimball, B. A., Quarles, D. R., Long, S. P., and Ort, D. R. 2007. Decreases in stomatal conductance of soybean under open-air elevation of CO₂ are closely coupled with decreases in ecosystem evapotranspiration. *Plant Physiology*, 143: 134–144.
- Hartman, G. L., West, E. D., and Herman, T. K. 2011. Cropping systems, disease management, and soybean yield loss in North America. *APS Journal of Plant Pathology*, 95(5): 572–578.
- Dusenge, M.E., Duarte, A.G. and Way, D.A. 2019. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 221(1): 32–49.
- Hatfield, J. L., and Prueger, J. H. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10.
- Herlina, N., dan Prasetyorini, A. 2020. Pengaruh perubahan iklim pada musim tanam dan produktivitas jagung (*Zea mays* L.) di Kabupaten Malang. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 25(1): 118–128.
- Irma, M. F., dan Gusmira, E. 2024. Tingginya kenaikan suhu akibat peningkatan emisi gas rumah kaca di Indonesia. *Jurnal Sains dan Sains Terapan*, 11(1): 26–32.
- Jamaludin, Gusmayanti, E., dan Anshari, G. Z. 2020. Emisi karbon dioksida (CO₂) dari pertanian skala kecil di lahan gambut. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3): 582–588.
- Kanemoto, K., Yamashita, Y., Ozawa, T., Imanishi, N., Nguyen, N. T., Suwa, R., et al. 2009. Photosynthetic acclimation to elevated CO₂ is dependent on N partitioning and transpiration in soybean. *Plant Science*, 177: 398–403.
- Lagiman, Suryawati, A., dan Widayanto, B. 2022. *Budidaya tanaman kedelai di lahan pasir pantai*. LPPM UPN Veteran Yogyakarta. Yogyakarta.
- Leakey, A. D. B., Ainsworth, E. A., Bernacchi, C. J., Rogers, A., Long, S. P., & Ort, D. R. 2009. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 60(10), 2859–2876.

- Maftukhah, U., Ulfaturrohmah, Sholikhah, N. I., dan Fawaida, U. 2023. Pengaruh cahaya terhadap proses fotosintesis pada tanaman naungan dan tanaman terpapar cahaya langsung. *Jurnal Pengabdian Masyarakat MIPA dan Pendidikan MIPA*, 7(1): 51–55.
- Mahardika, I. K., Bakriarso, S., Qowasmi, F. N., Agustin, A. W., dan Adelia, Y. L. 2023. Pengaruh intensitas cahaya matahari terhadap proses perkecambahan kacang hijau pada media tanam kapas. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 9(3): 312–316.
- Malau, L. R. E., Rambe, K. R., Ulya, N. A., dan Purba, A. G. 2023. Dampak perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan di Indonesia. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 23(1): 34–46.
- Nathaniel, W. W., Ort, D. R., Morrison, M. J., Cober, E. R., Samanfar, B., and Lawley, Y. E. 2022. Photoperiod affects node appearance rate and flowering in early maturing soybean. *Plants*, 11: 1–10.
- NOAA Global Monitoring Laboratory. 2025. Recent 2020–2025 monthly mean CO₂ data from Mauna Loa Observatory. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Prasetyawan, I. B., Maslukah, L., dan Rifai, A. 2017. Pengukuran sistem karbon dioksida (CO₂) sebagai data dasar penentuan fluks karbon di perairan Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*, 6(1): 9–16.
- Rizkyma, N. F., Nunik, S. A., dan Dorly. 2023. Fenologi fase pembungaan dan pembuahan serta produksi polen pada tanaman kacang panjang kultivar Sabrina. *Jurnal Sumberdaya Hayati*, 9(2): 87–95.
- Rozci, F. 2023. Dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian padi. *Jurnal Ilmiah Sosio Agribisnis*, 23(2): 108–116.
- Samidjo, J., dan Suharso, Y. 2017. Memahami pemanasan global dan perubahan iklim. *Jurnal Pawiyatan*, 24(2): 1–10.
- Santana, F. P., Ghulamahdi, M., dan Lubis, I. 2021. Respons pertumbuhan, fisiologi, dan produksi kedelai terhadap pemberian pupuk nitrogen dengan dosis dan waktu yang berbeda. *Jurnal Ilmu Pertanian*, 26(1): 24–31.
- Soleh, M. A., dan Kokubun, M. 2018. Peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu menyebabkan penurunan laju pembukaan stomata serta berat kering tanaman kedelai. *Jurnal Agrotek Indonesia*, 3(1): 34–38.

- Soybean Growth and Development. 2023. *Crop Science*, United States. Tersedia pada [https://www.cropscience.bayer.us/articles/bayer/soybean-growth-stages](https://www.cropsscience.bayer.us/articles/bayer/soybean-growth-stages)
- Sulaminingsih, Silamat, E., Ruruh, A., Syaiful, M., Ninasari, A., dan Muchdir, A. R. 2024. Dampak perubahan iklim terhadap peningkatan dan penurunan produktivitas tanaman pangan. *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, 7(3): 10189–10195.
- Sutoyo. 2011. Masalah dan peranan CO₂ pada produksi tanaman. *Jurnal Buana Sains*, 11(1): 83–90.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M. dan Murphy, A. 2015. *Plant Physiology and Development*. 6th ed. Sunderland: Sinauer Associates.
- Timotiwi, P. B., Manik, T. K., Agustiansyah, dan Pramono, E. 2021. Fenologi dan pertumbuhan tanaman strawberry di dataran rendah sebagai kajian awal dampak perubahan iklim terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman. *Jurnal Agrotropika*, 20(1): 1–10.
- Umarie, I., Widiarti, W., Oktarina, Nurhadiansyah, Y., dan Budiawan, A. 2021. Karakteristik fisiologi tanaman kedelai pada perlakuan frekuensi penyiangan dan pengendalian hama pada tumpangsari tebu–kedelai. *Agro Bali: Agricultural Journal*, 4(2): 177–191.
- Vogel, J.T., Liu, W., et al. 2021. Soybean yield formation physiology. *Frontiers in Plant Science*, 12:719706. doi:10.3389/fpls.2021.719706
- Yanti, D., Chatib, O. C., Safitri, I., and Hasanah, N. N. 2023. Mapping the potential development of soybean crops based on growing degree days. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 12(1): 57–76.
- Yu, J., Du, H., and Xu, M. 2012. Metabolic responses to heat stress under elevated atmospheric CO₂ concentration in a cool-season grass species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 137: 221–228.
- Yuriansyah, D., Denny, S., Herry, S., Zainal, M., Evi, Y., dan Juwita, S. M. 2023. Aplikasi Trichoderma sp. dan pupuk NPK terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai (*Glycine max* L.) varietas Grobogan. *Jurnal Tanaman Pangan dan Hortikultura*, 5(1): 29–41.
- Zheng, Y., Li, F., Hao, L., Yu, J., Guo, L., Zhou, H., Ma, C., Zhang, X., and Xu, M. 2019. Elevated CO₂ concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean. *BMC Plant Biology*.

Zolnikov, T. R., Garces, K. P., Bolter, K., Katelyn, M., and King, R. K. 2020.
Enhancing public health preparedness, response, and recovery capabilities
through the Florida Hurricane Response Hub. *Climate Risk Management* 30.