

**PEMANFAATAN MODEL FAO *AQUACROP* UNTUK MEMPREDIKSI
DAMPAK PERUBAHAN IKLIM PADA TANAMAN PADI
DI PROVINSI LAMPUNG**

(Tesis)

Oleh

RIZKI PRIATAMA WIBOWO

NPM 2124011008



PROGRAM STUDI MAGISTER AGRONOMI

FAKULTAS PERTANIAN

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

**PEMANFAATAN MODEL FAO *AQUACROP* UNTUK MEMPREDIKSI
DAMPAK PERUBAHAN IKLIM PADA TANAMAN PADI
DI PROVINSI LAMPUNG**

Oleh

RIZKI PRIATAMA WIBOWO

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

MAGISTER AGRONOMI

Pada

Program Studi Magister Agronomi

Fakultas Pertanian Universitas Lampung



PROGRAM STUDI MAGISTER AGRONOMI

FAKULTAS PERTANIAN

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRAK

PEMANFAATAN MODEL FAO *AQUACROP* UNTUK MEMPREDIKSI DAMPAK PERUBAHAN IKLIM PADA TANAMAN PADI DI PROVINSI LAMPUNG

Oleh

RIZKI PRIATAMA WIBOWO

Provinsi Lampung memiliki luas lahan sawah sebesar 390,327 ha dengan total produksi padi pada tahun 2022 mencapai 2,661,362.81 ton. Sebagai salah satu lumbung pangan nasional dan penghasil padi terbesar keenam di Indonesia, Provinsi Lampung perlu mewaspadai dampak perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perubahan iklim di masa mendatang terhadap tanaman padi di Lampung dengan menggunakan model AquaCrop, yang dikembangkan oleh FAO untuk mensimulasikan hasil panen dengan air sebagai faktor pembatas utama. Model proyeksi yang digunakan adalah CSIRO-Mk3.6.0 dari *The Marksim Weather Generator*, dengan skenario RCP 4.5 (emisi sedang) dan RCP 8.5 (emisi tinggi) untuk tahun 2050. Lokasi penelitian mencakup 15 titik yang mewakili masing-masing kabupaten di Provinsi Lampung.

Hasil proyeksi menunjukkan penurunan curah hujan secara konsisten di seluruh kabupaten pada bulan Juni hingga Desember, sedangkan bulan Januari hingga Mei tidak menunjukkan perubahan signifikan. Curah hujan pada musim kemarau (Juni-September) mengalami penurunan sebesar -41.7 mm/bulan pada RCP 4.5 dan -52.3 mm/bulan pada RCP 8.5 terhadap *baseline*. Sedangkan pada awal musim hujan (Oktober-Desember) pada RCP 4.5 sebesar -101.8 mm/bulan dan pada RCP 8.5 sebesar -108.9 mm/bulan. Hal ini menunjukkan bahwa musim kemarau menjadi semakin kering dan panjang dan menggeser awal musim hujan yang sebelumnya di bulan Oktober, menjadi bulan Desember atau mundur 2 bulan.

Evapotranspirasi juga diprediksi meningkat dari bulan Juni hingga Januari, berkontribusi pada defisit neraca air tanaman pada bulan Juni hingga November. Secara umum, produktivitas air tanaman padi mengalami penurunan sebesar -0.3 kg(hasil)/m³ air pada skenario RCP 4.5 dan -0.4 kg(hasil)/m³ air pada skenario RCP 8.5, sementara durasi pertumbuhan padi menjadi lebih singkat, berkisar antara 1 hingga 7 hari dibandingkan dengan *baseline*. Simulasi AquaCrop menunjukkan peningkatan produktivitas rata-rata pada musim tanam bulan April, masing-masing sebesar +0.25 ton/ha untuk RCP 4.5 dan +0.74 ton/ha untuk RCP 8.5, disebabkan oleh curah hujan yang relatif stabil dan peningkatan kadar CO₂. Sebaliknya, pada

musim tanam bulan November, terjadi penurunan produktivitas rata-rata sebesar -0.41 ton/ha untuk RCP 4.5 dan -0.75 ton/ha untuk RCP 8.5 akibat rendahnya curah hujan. Perubahan jadwal tanam yang semula November, menjadi Desember dapat meningkatkan produktivitas padi secara signifikan, dengan peningkatan sebesar +1.3 ton/ha pada RCP 4.5 dan +1.8 ton/ha pada RCP 8.5. Perubahan jadwal tanam ini cukup efektif sebagai adaptasi terhadap perubahan iklim pada tahun 2050.

Kata Kunci: Perubahan Iklim, Produktivitas padi, *AquaCrop*, *The Marksim Weather Generator*, RCP 4.5, RCP 8.5

ABSTRACT

UTILIZATION OF THE FAO AQUACROP MODEL TO PREDICT IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON RICE PLANTS IN LAMPUNG PROVINCE

By

RIZKI PRIATAMA WIBOWO

Lampung Province has a rice field area of 390,327 ha with a total rice production in 2022 reaching 2,661,362.81 tons. As one of the national food barns and the sixth largest rice producer in Indonesia, Lampung Province needs to be aware of the impacts of climate change. This study aims to analyze the impact of future climate change on rice crops in Lampung using the AquaCrop model, developed by FAO to simulate crop yields with water as the main limiting factor. The projection model used is CSIRO-Mk3.6.0 from The Marksim Weather Generator, with scenarios RCP 4.5 (moderate emissions) and RCP 8.5 (high emissions) for 2050. The study location covers 15 points representing each district in Lampung Province.

The projection results show a consistent decrease in rainfall across all districts from June to December, while January to May does not show significant changes. This decrease indicates that the dry season in April-October and the beginning of the rainy season in September-December will be drier in 2050. Monthly average air temperatures are projected to increase consistently in all districts, with an increase of around +1.6°C for the RCP 4.5 scenario and +1.9°C for RCP 8.5 compared to the baseline.

Evapotranspiration is also predicted to increase from June to January, contributing to a water balance deficit for crops between June and November. In general, the crops water productivity decreases by -0.3 kg (yield)/m³ of water under RCP 4.5 and -0.4 kg (yield)/m³ of water under RCP 8.5. Additionally, the growth duration of rice crops is shortened by 1 to 7 days compared to the baseline. The AquaCrop simulation shows an average productivity increase during the April planting season, with an additional +0.25 tons/ha under RCP 4.5 and +0.74 tons/ha under RCP 8.5. This is attributed to relatively stable rainfall and increased CO₂ levels. Conversely, in the November planting season, average productivity decreases by -0.41 tons/ha under RCP 4.5 and -0.75 tons/ha under RCP 8.5 due to reduced rainfall. Adjusting the planting schedule from November to December significantly improves rice productivity, with increases of +1.3 tons/ha under RCP 4.5 and +1.8 tons/ha under RCP 8.5. This adjustment in planting schedules proves

to be an effective adaptation strategy to mitigate the impacts of climate change by 2050.

Keywords: Climate Change, Rice Productivity, AquaCrop, The Marksim Weather Generator, RCP 4.5, RCP 8.5

Judul Tesis : PEMANFAATAN MODEL FAO *AQUACROP*
UNTUK MEMPREDIKSI DAMPAK
PERUBAHAN IKLIM PADA TANAMAN
PADI DI PROVINSI LAMPUNG

Nama Mahasiswa : RIZKI PRIATAMA WIBOWO

Nomor Pokok Mahasiswa : 2124011008

Program Studi : Magister Agronomi

Fakultas : Pertanian



1. Komisi Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Tumiari Katarina B. Manik, M.Sc. NIP 19630202 198703 2001
Prof. Dr. Ir. Paul Benyamin Timotiwi, M.S. NIP 19620928 198703 1001

Dr. Ir. Eko Pramono, M.S.
196108141986091001

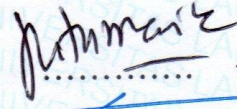
2. Ketua Program Studi Magister Agronomi

Prof. Dr. Ir. Yusnita, M.Sc.
NIP 19610803 198603 2002

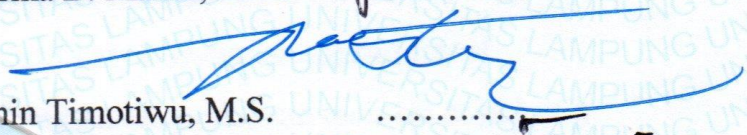
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

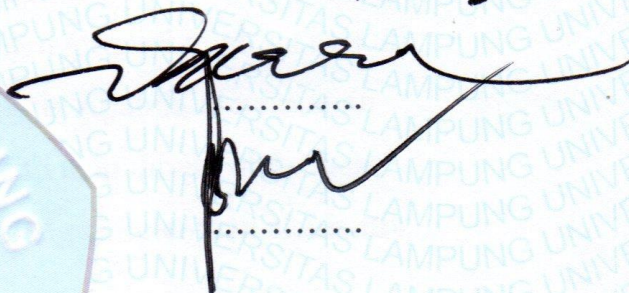
Pembimbing 1 : Prof. Dr. Ir. Tumiari Katarina B. Manik, M.Sc



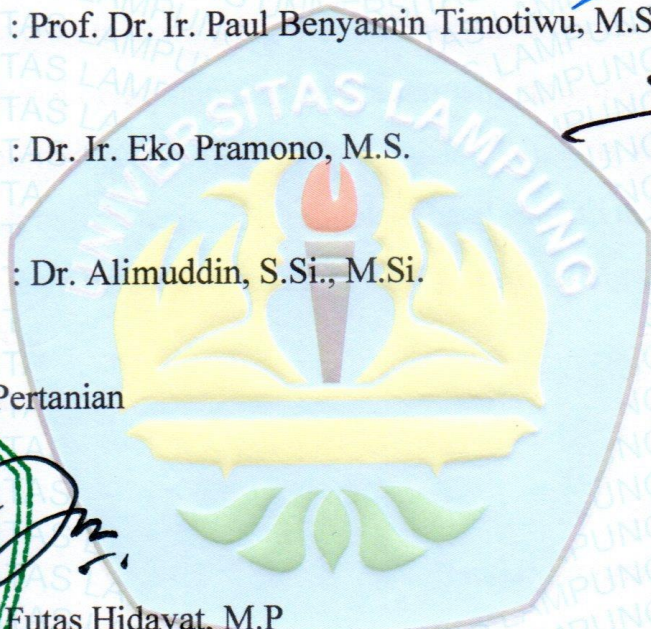
Pembimbing 2 : Prof. Dr. Ir. Paul Benyamin Timotiwi, M.S.



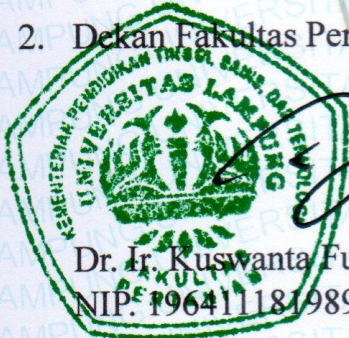
Pembimbing 3 : Dr. Ir. Eko Pramono, M.S.



Penguji : Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Pertanian



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

3. Direktur Pasca Sarjana Universitas Lampung



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 17 Desember 2024

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini, menyatakan bahwa tesis saya yang berjudul: **Pemanfaatan Model Fao Aquacrop Untuk Memprediksi Dampak Perubahan Iklim Pada Tanaman Padi Di Provinsi Lampung**, merupakan hasil karya sendiri bukan hasil karya orang lain. Akan tetapi beberapa bagian tertentu yang mendukung dalam penulisan tesis ini saya kutip dari hasil karya orang lain dan semua tertuang dalam tesis ini telah mengikuti kaidah Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa tesis ini merupakan hasil salinan atau dibuat oleh orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan akademik yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Januari 2025



Rizki Priatama Wibowo

NPM 2124011008

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Teluk Betung Tanggal 27 bulan April Tahun 1985 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Syaiful Bahri dan Ibu Tri Hastuti.

Riwayat pendidikan dimulai dari SDN 3 Kuripan, Kota Agung pada tahun 1992-1997, SMPN 1 Kota Agung pada tahun 1997-2000, dan SMUN 2 Bandar Lampung pada tahun 2000-2003. Pada tahun 2006-2009 penulis melanjutkan pendidikan Diploma III di Akademi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Jakarta dengan jurusan Meteorologi. Pada tahun 2009 diangkat menjadi Pegawai Negeri Sipil di Badan Meteorologi dan Geofisika dan ditempatkan di Stasiun Meteorologi Tanjung Balai Karimun, Kepulauan Riau. Penulis menikah dengan Ira Marby HS pada tahun 2011, dan telah dikaruniai empat orang anak. Pada tahun 2015-2016 penulis melanjutkan pendidikan Diploma IV jurusan Klimatologi di Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika. Kemudian pada tahun 2016 hingga saat ini penulis bertugas di Stasiun Klimatologi Lampung. Pada tahun 2021 penulis melanjutkan pendidikan Strata II dengan jurusan Magister Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Dengan segala puji syukur kehadiran Allah Subhanahu Wata'ala dan segala ketulusan hati, ku persembahkan karya sederhana ini sebagai tanda bakti dan cintaku kepada :

Kedua orangtua tercintaku, yang telah mencurahkan kasih sayang kepada penulis sejak lahir hingga sekarang.

Istriku dan anak-anakku tercinta yang telah memberikan dukungan yang tak terhingga kepada penulis.

Dosen pembimbing dan penguji yang telah tulus ikhlas mencurahkan ilmunya dalam membimbing penulis.

Rekan-rekan Mahasiswa Magister Agronomi angkatan 2021

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis haturkan kepada Allah Subhanallahu wataala, yang maha pengasih dan maha penyayang, hanya atas izinNya pertolonganNya, penulis dapat menyelesaikan perkuliahan di Magister Agronomi dan menyelesaikan tesis dengan judul **“Pemanfaatan Model Fao Aquacrop Untuk Memprediksi Dampak Perubahan Iklim Pada Tanaman Padi Di Provinsi Lampung”**

Selama proses penyusunan tesis ini, penulis menyadari ada banyak keterbatasan kemampuan yang Penulis miliki. Selama penulisan Tesis ini penulis banyak mendapatkan bimbingan, bantuan, dukungan, serta arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.IPM, ASEAN Eng selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si selaku Direktur Pasca Sarjana Universitas Lampung;
3. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P, selaku Dekan Fakultas Pertanian;
4. Prof. Dr. Ir. Yusnita, M.Sc Ketua Program Studi Magister Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung atas segala fasilitas, ilmu serta motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan tesis ini;
5. Prof. Dr. Ir. Tumiar Katarina B. Manik, M.Sc, selaku pembimbing pertama yang juga merangkap pembimbing akademik atas bimbingan, ilmu, arahan, dorongan, motivasi serta dengan penuh kesabaran dalam membimbing penulis dalam menyelesaikan Tesis ini;
6. Prof. Dr. Ir. Paul Benyamin Timotiwu, M.S, selaku pembimbing kedua atas bimbingan, arahan, nasihat dan semangat kepada penulis yang

- diberikan kepada penulis hingga terselesaikannya Tesis ini;
7. Dr. Ir. Eko Pramono, M.S, selaku pembimbing ketiga, terima kasih atas bimbingan, nasihat, saran dan masukan yang sangat berarti bagi penulis hingga terselesaikannya Tesis ini;
 8. Dr. Alimuddin, S.Si, M.Si selaku penguji atas segala saran, masukan, nasihat dan wawasan hingga terselesaikannya Tesis ini;
 9. Seluruh dosen Magister Agronomi atas ilmu dan wawasan yang telah diberikan;
 10. Kedua orang tua penulis, papa Syaiful Bahri رَحْمَةُ اللَّهِ dan mama Tri Hastuti yang sudah membesarkan dengan penuh kasih sayang, yang selalu mendoakan dan memberikan dukungannya sepenuh hati;
 11. Istriku tercinta, Ira Marby, HS, SS, M.Si yang selama ini tidak hentinya memberikan cinta, kasih sayang, dukungan, serta motivasi yang tiada henti, sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini. Serta Anak-anakku Arkan Abdurrahman, Aisyah Sabreen dan Adrina Scientia Hafsa yang merupakan penyemangat hidup dan penyejuk hati bagi penulis;
 12. Rekan-rekan Magister Agronomi angkatan 2021 yang selalu memberikan dukungan serta semangat;
 13. Keluarga Besar BMKG khususnya stasiun klimatologi Lampung yang telah memberikan dukungannya dan pengertiannya selama ini;
 14. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang secara langsung telah membantu penulis dalam penyelesaian tesis ini;

Semoga Allah Subhanahuwa Ta'ala membalas dengan kebaikan yang berlimpah kepada semua pihak dengan membantu dalam penyelesaian tesis ini, dan semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi semua.

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI	XIII
DAFTAR TABEL	XV
DAFTAR GAMBAR	XVI
I. PENDAHULUAN	18
1.1. Latar Belakang dan Masalah	18
1.2. Tujuan	22
1.3. Kerangka Pemikiran	22
1.4. Hipotesis.....	24
II. TINJAUAN PUSTAKA	26
2.1. Perubahan Iklim.....	26
2.2. Representative Concentration Pathways (RCP)	27
2.3. <i>The Marksim Weather Generator</i> Sebagai Sumber Data Iklim	28
2.4. Penggunaan <i>Aquacrop</i> Untuk Melihat Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Padi	30
III. BAHAN DAN METODE	33
3.1. Tempat dan Waktu	33
3.2. Bahan dan Alat	35
3.2.1. Sumber data	35
3.2.2. Analisa data	35
3.3 Pelaksanaan Penelitian.....	38

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1. Perubahan Tren Suhu Udara Tahun 1976-2022	43
4.2. Perubahan Pola Curah Hujan dan Suhu Udara.....	44
4.2.1. Perubahan Pola Curah Hujan.....	44
4.2.2. Perubahan Suhu Udara Rata-Rata.....	47
4.3. Analisa Sampel Tanah.....	50
4.4. Hasil simulasi <i>AquaCrop</i> untuk produktivitas padi tahun 2011-2022.....	51
4.5. Analisa Perubahan Luas Panen dan Produktivitas Padi Terhadap Laju Perubahan Suhu Udara tahun 1976-2022	56
4.5. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Neraca Air Tanaman Padi Pada Tahun 2050	58
4.5.1. Perubahan Laju Evapotranspirasi	58
4.5.2. Neraca Air Tanah Tanaman Padi tahun 2050.....	60
4.6. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produktivitas Air Tanaman padi	64
4.7. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Lama Pertumbuhan Padi	65
4.8. Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produktivitas Padi	67
4.8.1. Musim Tanam April 2050.....	67
4.8.2. Musim Tanam November 2050	69
4.8.3. Pergeseran Musim Tanam Menjadi Desember 2050	73
4.9. Langkah Antisipasi Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Padi Pada Tahun 2050	76
V. SIMPULAN DAN SARAN	79
5.1. Simpulan	79
5.2. Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	81

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Lokasi Penelitian	34
2. Parameter padi yang disesuaikan menurut deskripsi varietas unggul tanaman padi 2023	40
3. Perbandingan curah hujan rata-rata di Provinsi Lampung antara Baseline, RCP 4.5 dan RCP 8.5	47
4. Tekstur tanah Lokasi penelitian berdasarkan analisis laboratorium.....	50
5. Data produktivitas aktual padi per kabupaten aktual dari dalam ton/ha (sumber: BPS Provinsi Lampung).....	54
6. Uji statistik <i>Root Mean Square Error</i> dan Koesien Determinasi (R^2) antara data aktual dari BPS dan data dari <i>AquaCrop</i>	55
7. Perbandingan produktivitas padi antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada musim tanam bulan April.....	69
8. Perbandingan Produktivitas Padi antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada musim tanam bulan November.....	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pemikiran.....	24
2. Kategori skenario perubahan iklim berdasarkan tingkat konsentrasi gas CO ₂ (IPCC, 2014).....	28
3. Bagan komponen <i>AquaCrop</i>	32
4. Lokasi Penelitian	33
5. Skema neraca air tanaman pada <i>AquaCrop</i>	36
6. Menu halaman muka <i>AquaCrop</i>	38
7. Menu import data klimatologi.....	39
8. Parameter Crop pada <i>AquaCrop</i>	40
9. Parameter tanah pada <i>AquaCrop</i>	41
10. Diagram alur penelitian.....	42
11. Tren suhu udara rata-rata tahun 1976-2022 (sumber data BMKG Stasiun Radin Inten II Lampung).....	43
12. Perbandingan pola curah hujan bulanan antara <i>baseline</i> dengan proyeksi skenario RCP 4.5 dan 8.5 pada tahun 2050.....	47
13. Perbandingan pola suhu udara rata-rata bulanan hujan antara <i>baseline</i> dengan proyeksi skenario RCP 4.5 dan 8.5 pada tahun 2050	50
14. Grafik perbandingan antara produktivitas model <i>AquaCrop</i> dengan data aktual tahun 2011 - 2022.....	53
15. Grafik perbandingan antara luas panen dengan produktivitas tanaman padi tahun 1976-2022	57
16 Grafik perbandingan antara produktivitas tanaman padi dengan kenaikan suhu udara rata-rata tahun 1976-2022.....	58
17. Grafik perbandingan Evapotranspirasi maksimal (ETX) antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan 8.5 tahun 2050.....	60

18. Neraca air tanaman padi tahun 2050 berdasarkan RCP 4.5	62
19. Neraca air tanaman padi tahun 2050 berdasarkan RCP 8.5	64
20. Perbandingan Produktivitas Air Hasil Panen tanaman padi antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan RCP 8.5 tahun 2050.....	65
21. Perbandingan Lama Pertumbuhan Padi antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan RCP 8.5 tahun 2050	66
22. Grafik perbandingan produktivitas padi antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada musim tanam bulan April.....	68
23 Selisih antara produktivitas <i>baseline</i> dengan skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada musim tanam April dan musim tanam November.....	71
24. Perbandingan Produktivitas Padi antara <i>baseline</i> dengan RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada musim tanam bulan November.....	72
25 Perbandingan produktivitas antara musim tanam November dan Desember 2050 pada RCP 4.5	75
26 Perbandingan produktivitas antara musim tanam November dan Desember 2050 pada RCP 8.5	75

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Kebutuhan pangan global kedepan sebagai dampak dari perubahan iklim merupakan isu yang sangat penting saat ini. Perubahan iklim yang diakibatkan oleh aktivitas manusia telah memperlambat pertumbuhan produktivitas pertanian selama 50 tahun terakhir. Populasi global diproyeksikan mencapai sekitar 9,6 miliar pada tahun 2050 dan permintaan akan pangan diperkirakan akan meningkat drastis, dengan perkiraan kebutuhan akan pangan meningkat 60% lebih banyak secara global dan 100% lebih banyak di negara-negara berkembang (Yildiz, 2019). Untuk memenuhi kebutuhan ini, produksi pangan global harus meningkat antara 70% hingga 100% dibandingkan dengan tingkat saat ini (Dybro & Hansen, 2018). Selain itu, iklim ekstrem seperti kekeringan dan banjir berkontribusi terhadap berkurangnya ketersediaan pangan sehingga mengancam sistem ketahanan pangan, gizi dan penghidupan ratusan juta orang di dunia (Pereira et al., 2022). Jumlah orang yang menderita kerawanan pangan akut telah meningkat sejak 2014, meskipun produksi pangan meningkat dua kali lipat selama tiga dekade terakhir (Raj et al., 2022).

Perubahan iklim merupakan tantangan global yang berdampak pada setiap negara di dunia. Kerugian ekonomi akibat bencana yang disebabkan oleh perubahan iklim diperkirakan mencapai ratusan miliar dolar setiap tahunnya. Selain itu, diperlukan investasi sebesar 6 miliar dolar AS per tahun untuk mendukung pengelolaan risiko bencana secara efektif. Mengambil langkah-langkah cepat dan strategis untuk mengatasi perubahan iklim serta dampaknya merupakan salah satu tujuan utama yang diangkat dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*) 2030, khususnya pada tujuan ke-13. (Bappenas, 2023).

Indonesia merupakan negara dengan populasi terbesar kelima di dunia dengan jumlah penduduk Indonesia mencapai 270,2 juta jiwa pada tahun 2020 dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,17% per tahun (BPS, 2024b). Peningkatan jumlah penduduk ini secara langsung berdampak pada meningkatnya kebutuhan pangan nasional setiap tahunnya. Sebagai makanan pokok, nasi dikonsumsi oleh penduduk Indonesia setiap hari, dengan rata-rata konsumsi beras sebesar 1,6 kg per kapita per minggu. Namun, produksi beras nasional menunjukkan ketidakstabilan dan cenderung menurun dalam lima tahun terakhir, menimbulkan tantangan serius bagi ketahanan pangan nasional (BPS, 2024a).

Menurut data BPS (2023), Provinsi Lampung merupakan produsen padi terbesar keenam di Indonesia, dengan total produksi sebesar 2,661,362.81 ton dan luas panen 489,573.23 hektar. Dari total luas lahan sawah sebesar 390,327 hektar, terdapat 192.984 hektar sawah irigasi dan 197,343 hektar sawah non-irigasi. Kabupaten Lampung Tengah dan Lampung Timur adalah kabupaten dengan produksi padi tertinggi di Provinsi Lampung, masing-masing menghasilkan 490,369.96 ton dan 397,256.43 ton pada tahun 2021. Sebagai salah satu lumbung pangan nasional dengan wilayah penanaman padi yang luas, Provinsi Lampung perlu memperhatikan risiko tinggi terhadap dampak perubahan iklim, yang dapat mempengaruhi produktivitas pertanian di masa depan

Kegiatan pertanian sangat dipengaruhi oleh faktor iklim dan lingkungan, sehingga perubahan iklim menjadi ancaman serius bagi ketahanan pangan. Perubahan iklim memberikan tekanan pada sistem produksi pangan, yang dapat mengganggu proses produksi, distribusi, dan penyimpanan pangan. Selain itu, perubahan iklim juga mempengaruhi akses masyarakat terhadap pangan serta stabilitas harga komoditas. Dampak ini mencakup berkurangnya hasil panen, meningkatnya risiko gagal panen, serta ketidakpastian pasokan pangan, yang pada akhirnya merusak ketahanan pangan secara keseluruhan. (Harvian & Yuhan, 2021).

Hasil observasi menunjukkan bahwa suhu permukaan di seluruh wilayah Asia telah mengalami peningkatan sejak awal abad ke-21. Peningkatan suhu ini memperbesar ancaman gelombang panas di seluruh Asia, serta menyebabkan penundaan dan pelemahan sirkulasi monsun di Asia Selatan dan Tenggara.

Indonesia, khususnya Provinsi Lampung, sangat dipengaruhi oleh sirkulasi monsun Asia. Menurut penelitian. Menurut penelitian Manik et al (2014) perubahan iklim di Provinsi Lampung ditandai dengan penurunan curah hujan dan kenaikan suhu udara antara 0,32 hingga 0,7°C. Peningkatan suhu ini secara substansial meningkatkan keterpaparan terhadap dampak iklim, yang berdampak merugikan pada setiap sektor pangan. Dampak perubahan iklim berbeda-beda di setiap wilayah, di mana risiko terbesar dihadapi oleh daerah dengan ketahanan manusia yang rendah. Secara keseluruhan, perubahan iklim berpengaruh negatif terhadap hasil panen dan kualitas jual produk pertanian (Pereira et al., 2022).

Pemanasan global sejak era pra-industri telah memberikan dampak signifikan terhadap produksi tanaman secara global dengan menghambat produktivitas pertanian. Tren pemanasan antropogenik berkontribusi terhadap penurunan hasil tanaman, seperti jagung sebesar 5,9%, gandum sebesar 4,9%, dan padi sebesar 4,2%. Di Asia Tenggara, hasil observasi menunjukkan bahwa perubahan iklim berdampak negatif pada tanaman padi dan jagung. Kombinasi antara panas dan kekeringan telah menurunkan hasil rata-rata global jagung, kedelai, dan gandum masing-masing sebesar 11,6%, 12,4%, dan 9,2%. Di Afrika bagian selatan dan tenggara, curah hujan yang tidak menentu serta suhu tinggi meningkatkan kerentanan lahan pertanian, menyebabkan kekeringan berkepanjangan yang semakin sering terjadi. Dampak perubahan iklim pada sektor produksi pangan diperkirakan akan semakin parah apabila suhu global meningkat lebih dari 2°C, yang akan menekan produksi pangan, terutama di wilayah Afrika Sub-Sahara, Asia Selatan, dan Asia Tenggara. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa tanpa adanya langkah-langkah adaptasi yang tepat, banyak negara berkembang akan mengalami penurunan signifikan dalam hasil panen, terutama di Asia Selatan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan kenaikan harga komoditas pertanian (Khanal, 2021).

Peningkatan radiasi matahari dan suhu udara berkontribusi terhadap peningkatan laju evaporasi dan evapotranspirasi. Ketika suhu udara naik, tingkat penguapan dari permukaan tanah juga meningkat, karena udara yang lebih hangat mampu menahan lebih banyak kelembapan, sehingga mempercepat proses penguapan air. Selama periode kemarau, defisit curah hujan menyebabkan kondisi langit cerah

dan tingkat kelembapan yang rendah, yang memperburuk laju evaporasi dan evapotranspirasi. Kondisi ini mengakibatkan percepatan kehilangan air dari tanah, danau, dan waduk, yang berdampak negatif pada ketersediaan sumber daya air. (Abtew & Melesse, 2013).

Untuk memproyeksikan kondisi iklim di masa depan, IPCC mengembangkan berbagai skenario iklim yang dikenal sebagai *Representative Concentration Pathways* (RCPs) dalam laporan IPCC kelima tahun 2014. RCP terdiri dari empat jalur konsentrasi, yaitu: RCP 2.6 yang mencerminkan skenario mitigasi ketat, RCP menengah yaitu RCP 4.5 dan RCP 6.0, serta RCP 8.5 yang menggambarkan skenario dengan emisi gas rumah kaca yang sangat tinggi. Proyeksi menunjukkan bahwa suhu permukaan akan meningkat sepanjang abad ke-21 di bawah semua skenario tersebut. Diperkirakan, gelombang panas akan terjadi lebih sering dan lebih lama, serta peristiwa hujan ekstrem akan menjadi lebih intens dan sering terjadi di berbagai wilayah (Pachauri et al., 2014).

Perubahan iklim berpotensi memberikan dampak negatif terhadap produktivitas tanaman dan ketahanan pangan. Oleh karena itu, penting untuk memahami dampak perubahan iklim terhadap produksi tanaman di masa mendatang. Salah satu model yang dapat digunakan untuk menganalisis dampak tersebut adalah *AquaCrop*, yang dikembangkan oleh FAO. *AquaCrop* merupakan model tanaman yang dirancang untuk mensimulasikan hasil panen dengan mempertimbangkan air sebagai faktor pembatas utama. Model ini mampu memprediksi dampak kenaikan suhu udara, konsentrasi gas CO₂, dan perubahan pola curah hujan terhadap neraca air dan produktivitas tanaman dalam kondisi perubahan iklim. (Steduto et al., 2012).

Berdasarkan latar belakang tersebut perlu dilakukan penelitian bagaimana pergerakan perubahan suhu udara dan curah hujan di masa mendatang dengan menggunakan data proyeksi berdasarkan skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5. Lalu dengan simulasi *AquaCrop* diketahui bagaimana dampak perubahan iklim tersebut terhadap tanaman padi dalam aspek laju evapotranspirasi, dan neraca air, produktivitas, produktivitas air dan lama pertumbuhan padi di Provinsi Lampung pada tahun 2050.

1.2. Tujuan

Dengan demikian, tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui tren perubahan suhu udara secara historis (1976-2022), serta perubahan pola suhu udara dan curah hujan pada tahun 2050.
2. Memvalidasi model Aquacrop dalam simulasi produktivitas tanaman padi berdasarkan data historis tahun 2011-2022
3. Melakukan simulasi tanaman padi dengan *AquaCrop* menggunakan data skenario perubahan iklim RCP 4.5 dan RCP 8.5 pada tahun 2050

1.3. Kerangka Pemikiran

Perubahan iklim menyebabkan kenaikan suhu udara, peningkatan radiasi matahari, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan konsentrasi gas CO₂. Kenaikan suhu udara berkontribusi pada peningkatan laju evaporasi, karena suhu yang lebih tinggi meningkatkan penguapan air dari tanah. Peningkatan radiasi matahari juga merangsang aktivitas fotosintesis, sehingga tanaman menyerap lebih banyak air dari tanah dan mengeluarkannya melalui transpirasi. Akibatnya, peningkatan laju evaporasi dan transpirasi ini bersama-sama meningkatkan laju evapotranspirasi, yang berdampak pada ketersediaan air tanah dan produktivitas tanaman.

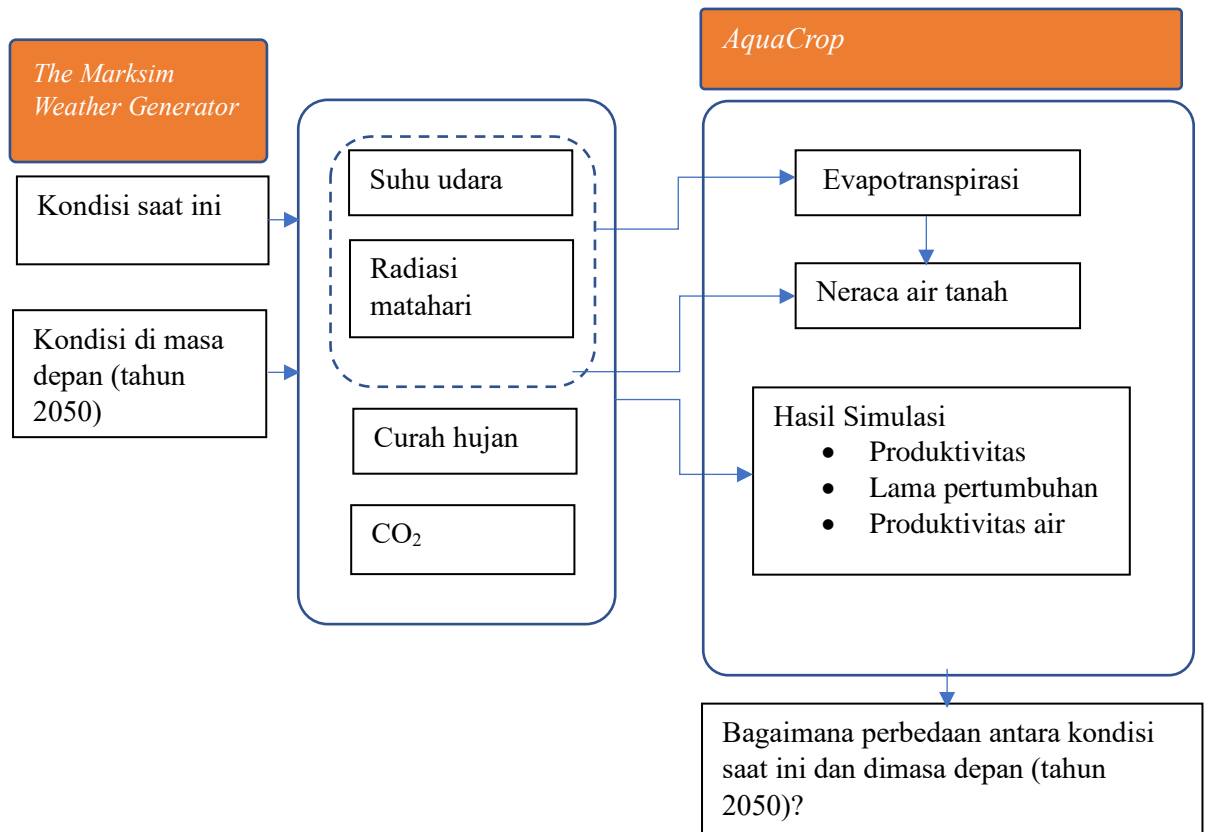
Perubahan iklim juga berdampak pada neraca air tanah. Pola curah hujan yang dipengaruhi oleh perubahan iklim dapat mengalami peningkatan atau penurunan. Penurunan curah hujan akan mengurangi jumlah air yang meresap ke dalam tanah. Selain itu, perubahan iklim menyebabkan peningkatan intensitas curah hujan yang ekstrem, yang dapat mengakibatkan bencana seperti banjir dan kekeringan. Banjir dapat mengganggu proses penyerapan air di tanah, karena air tidak memiliki cukup waktu untuk meresap ke dalam tanah. Di sisi lain, periode kekeringan yang berkepanjangan dapat menyebabkan penurunan tingkat air tanah akibat minimnya curah hujan dan tingginya laju evapotranspirasi.

Perubahan unsur-unsur iklim tersebut pada akhirnya akan mempengaruhi produksi padi, lama pertumbuhan dan produktivitas air. Sehingga perlu dilakukan

penelitian bagaimana perbandingan neraca air tanah dan produksi padi antara kondisi saat ini dan kondisi dimasa mendatang dengan menggunakan data proyeksi RCP 4.5 dan RCP 8.5.

AquaCrop adalah sebuah model komputer yang dikembangkan oleh FAO memprediksi produksi tanaman. Model ini dirancang khusus untuk mengestimasi potensi hasil dan kebutuhan air dari berbagai jenis tanaman air dalam berbagai kondisi lingkungan. *AquaCrop* dapat mengestimasi evapotranspirasi tanaman dan menghitung neraca air tanah. Selain itu kegunaan *AquaCrop* adalah untuk mengetahui dampak perubahan iklim terhadap produktivitas tanaman.

Untuk menjalankan simulasi tanaman pada *AquaCrop*, selain menggunakan data observasi, juga digunakan data model dari *The Marksim Weather Generator*. Model iklim ini dapat menghasilkan parameter cuaca untuk melengkapi data iklim historis, maupun menghasilkan data iklim masa depan berdasarkan proyeksi RCP 4.5 dan 8.5. Diharapkan dengan melakukan simulasi tanaman padi menggunakan *AquaCrop* dan model iklim dari *The Marksim Weather Generator* peneliti mampu mengetahui bagaimana dampak perubahan iklim terhadap tanaman padi di masa yang akan datang. Berdasarkan penjelasan diatas, disusun kerangka pemikiran sebagai berikut:



Gambar 1. Kerangka pemikiran

1.4. Hipotesis

Hipotesis dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Suhu udara pada tahun 2050 lebih tinggi daripada suhu udara pada data historis (1976-2022) sedangkan curah hujan akan mengalami penurunan
2. Model *AquaCrop* mampu memsimulasikan produktivitas padi dengan baik di Provinsi Lampung berdasarkan data iklim historis (2011-2022)
3. Berdasarkan skenario perubahan iklim RCP 4.5 dan RCP 8.5, pada tahun 2050 akan terjadi peningkatan laju evapotranspirasi, penurunan produktivitas air, pertumbuhan tanaman padi yang semakin cepat dan penurunan produktivitas padi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perubahan Iklim

Perubahan iklim didefinisikan sebagai perubahan pola iklim dalam waktu yang panjang, yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca. Pemanasan global disebabkan oleh terperangkapnya panas di atmosfer akibat dari kenaikan emisi gas rumah kaca. Emisi gas rumah kaca dapat disebabkan oleh alam dan aktivitas manusia terkait produksi energi, aktivitas industri, dan perubahan penggunaan lahan. Gas rumah kaca terdiri dari dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), dan gas fluorinasi seperti hidrofluorokarbon (HFC), perfluorokarbon (PFC) (Fawzy et al., 2020).

Tren perubahan iklim dapat dilihat dari peningkatan suhu udara permukaan dan kenaikan suhu malam hari, yang disertai dengan perubahan variabilitas curah hujan. Perubahan iklim juga mengakibatkan peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem di Asia. Prediksi untuk masa depan menunjukkan bahwa ketahanan pangan dan sektor pertanian akan terpengaruh secara substansial, terutama pada tanaman serealia, menjelang akhir abad ke-21 (Pereira et al., 2022). Perubahan iklim mempengaruhi pola dan intensitas curah hujan serta laju evapotranspirasi, yang pada gilirannya mengganggu kadar air tanah, drainase, limpasan, dan penyerapan air oleh tanaman. Kejadian banjir dan kekeringan dapat memengaruhi setiap tahapan pertumbuhan tanaman, termasuk pembungaan, penyerbukan, dan pengisian bulir (Hussain et al., 2019).

Penelitian terdahulu tentang perubahan iklim di Lampung dilakukan oleh Manik et al (2014) dengan menggunakan data curah hujan selama 34 tahun dari lokasi dataran tinggi dan pesisir di Lampung, menunjukkan bahwa telah terjadi kenaikan suhu di Lampung dimana pada tahun 1991-2010 lebih tinggi daripada tahun 1976-1990, dengan rata-rata kenaikan suhu udara 0.7°C untuk suhu maksimum, dan 0.32°C untuk suhu minimum. Penurunan normal curah hujan juga terjadi, dimana

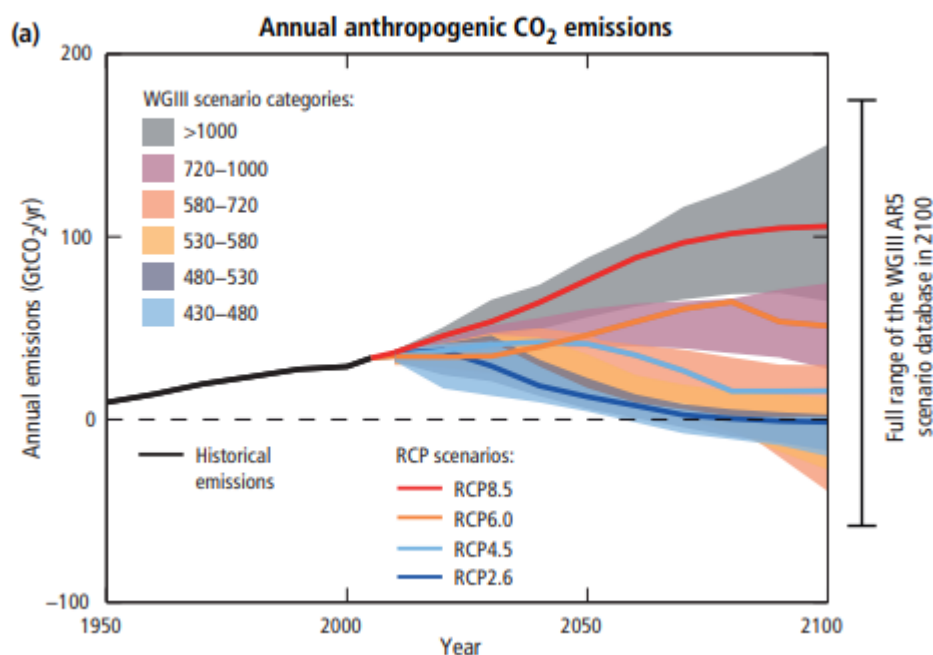
pada daerah pesisir terjadi penurunan curah hujan yang lebih tajam (30mm/tahun) dibandingkan dataran tinggi (23 mm/tahun). Distribusi curah hujan mengalami perubahan dimana peluang curah hujan tertinggi menurun sejak tahun 1991 untuk dataran tinggi, dan 1996 untuk pesisir. Sedangkan pola umum musim berkaitan dengan awal musim tidak berubah selama 34 tahun, walaupun terjadi tren penurunan curah hujan.

Kusumastuty (2021) menganalisis kondisi iklim di Bandar Lampung berdasarkan data historis observasi dan data proyeksi perubahan iklim RCP 4.5 dan 8.8 tahun 2020-2049. Dari hasil penelitian terjadi penurunan tren curah hujan baik pada data historis maupun data proyeksi pada sebagian besar musim, kecuali musim kemarau. Sedangkan suhu udara mengalami tren kenaikan secara konsisten.

2.2. Representative Concentration Pathways (RCP)

Representative Concentration Pathways (RCP) adalah serangkaian skenario yang menggambarkan berbagai lintasan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dan tingkat pemaksaan radiatif yang terkait, yang sangat penting untuk pemodelan dan penilaian iklim. Dikembangkan untuk Laporan Penilaian Kelima (AR5) oleh Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), RCP menyediakan kerangka kerja untuk memahami potensi masa depan iklim berdasarkan berbagai tingkat aktivitas manusia dan respons kebijakan terhadap perubahan iklim (Gupta & Sharif, 2021).

RCP memiliki empat jalur berbeda, yang masing-masing dicirikan oleh target khusus untuk pemaksaan radiatif pada tahun 2100: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5. RCP 2.6 merupakan skenario mitigasi yang ketat, yang bertujuan untuk membatasi pemanasan global melalui strategi pengurangan GRK yang agresif, sementara RCP 8.5 sering disebut sebagai skenario "bisnis seperti biasa", yang memproyeksikan emisi tinggi dan dampak iklim yang signifikan karena upaya mitigasi yang minimal (Riahi et al., 2011). RCP 4.5 dan RCP 6.0 mewakili jalur peralihan, dengan RCP 4.5 menstabilkan pemaksaan radiasi pada 4,5 W/m² dan RCP 6.0 menstabilkan pada 6,0 W/m², yang mencerminkan berbagai tingkat implementasi kebijakan iklim dan kemajuan teknologi (Thomson et al., 2011).



Gambar 2. Kategori skenario perubahan iklim berdasarkan tingkat konsentrasi gas CO₂ (IPCC, 2014)

Proyeksi iklim masa depan skala global telah di pelajari menggunakan proyeksi perubahan iklim skala global Global Circulation Model (GCM), yang merupakan cara yang efektif dalam mengeksplorasi proses dinamika laut-atmosfer dan dapat memberikan informasi iklim historis, saat ini dan masa depan (Kumar et al., 2017). Proyeksi klimatologi menyediakan estimasi perubahan iklim dibawah berbagai skenario emisi rumah kaca, yang merupakan satu-satunya data iklim di masa depan (hingga tahun 2100), walaupun memiliki kelemahan memiliki bias yang tinggi.

2.3. *The Marksim Weather Generator* Sebagai Sumber Data Iklim

Cuaca merupakan penentu utama pada produksi pertanian, oleh karenanya ketersediaan data cuaca yang terbatas menjadi kendala serius untuk melakukan penelitian. Penggunaan data satelit atau big data sudah umum digunakan dalam penelitian. Salah satu Big Data yang dapat digunakan adalah *The Marksim Weather Generator*, yang merupakan hasil *downscaling* dari General Circulation

Model (GCM). GCM di *downscaling* dengan menghitung hubungan dengan data dari stasiun meteorologi. Terdapat dua aspek *downscaling*, yaitu menginterpolasi hasil GCM secara spasial dan untuk memastikan hasilnya relevan dengan iklim setempat.

The Marksim Weather Generator adalah salah satu model generator cuaca yang digunakan untuk menghasilkan data cuaca sintetis atau artifisial. Perangkat lunak ini bertujuan untuk menyediakan serangkaian data cuaca yang dapat digunakan dalam berbagai analisis dan simulasi terkait kondisi cuaca. Penggunaannya mencakup berbagai bidang, seperti penelitian pertanian, hidrologi, dan perubahan iklim. Model ini sangat bermanfaat untuk menghasilkan data cuaca jangka panjang, terutama di wilayah yang memiliki keterbatasan atau ketiadaan data cuaca historis.

Metodologi yang digunakan oleh *MarkSim* memungkinkannya untuk secara efektif mensimulasikan kondisi iklim masa depan dengan mengintegrasikan masukan dari berbagai GCM, sehingga memberikan gambaran yang lebih detail tentang potensi perubahan iklim pada skala lokal (Patel et al., 2018) *The Marksim Weather Generator* menggunakan 720 kelas cuaca di seluruh dunia untuk menghitung koefisien curah hujan Markov ordo ketiga yang telah dikembangkan selama 20 tahun. *The Marksim Weather Generator* menurunkan skala data cuaca GCM dengan proses stokastik. *MarkSim* dapat memberikan data klimatologi masa depan yang dapat digunakan oleh pembuat model dampak iklim terhadap pertanian (Jones & Thornton, 2013).

Salah satu model GCM yang ada adalah CSIRO-Mk3.6.0 yang dikembangkan oleh *The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) dan *Queensland Climate Change Centre of Excellence* (QCCCE) yang merupakan lembaga riset pemerintah Australia dalam *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). CSIRO-Mk3.6.0 memiliki resolusi horizontal sekitar $1.9^{\circ} \times 1.9^{\circ}$. Model iklim tersebut juga dapat diakses melalui *The Marksim Weather Generator* yang dapat mensimulasikan data iklim pada kondisi saat ini dan data iklim proyeksi masa depan.

Pemanfaatan data iklim dari hasil pemodelan seperti yang dihasilkan oleh Marksिम dapat digunakan pada berbagai penelitian dampak perubahan iklim pada berbagai tanaman. Beberapa penelitian yang menggunakan data model dari Marksिम adalah (Patel et al., 2018) yang mensimulasikan bagaimana perubahan iklim mempengaruhi tanaman gandum dengan menggunakan model GFDL-CM3 dari Marksिम pada skenario RCP 2.6, 4.5, 6.0 dan 8.5 pada tahun 2010, 2035, 2065 dan 2095 di daerah Varanasi, dan Uttar Pradesh India. Dari penelitian tersebut perubahan iklim mengakibatkan durasi penanaman gandum dan menurunkan hasil gandum pada wilayah yang diteliti. Penurunan hasil tertinggi sebesar -23 hingga -61% terjadi pada skenario RCP 8.5.

Pada penelitian lain (Ansari et al., 2021) meneliti pengaruh perubahan iklim terhadap produksi padi di Keduang Jawa Barat. Data perubahan iklim di tahun 2021-2050 dibawah RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, dan RCP 8.5 dari Marksिम digunakan dalam penelitian dengan menggunakan 17 model iklim yang berbeda. Dengan menggunakan model simulasi DSSAT-CERES, hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario iklim dimasa depan terjadi kenaikan suhu udara, pola curah hujan, intensitas radiasi matahari pada RCP yang berbeda. Dari simulasi model diketahui bahwa terjadi penurunan produksi beras pada tiga musim tanam pada semua skenario perubahan iklim. Penurunan produksi terjadi pada musim kemarau sebesar 11.77% pada RCP 8.5 tahun 2050. Sementara penurunan hasil pada musim hujan disebabkan oleh stress kelembaban dari tingginya frekuensi dan intensitas hujan.

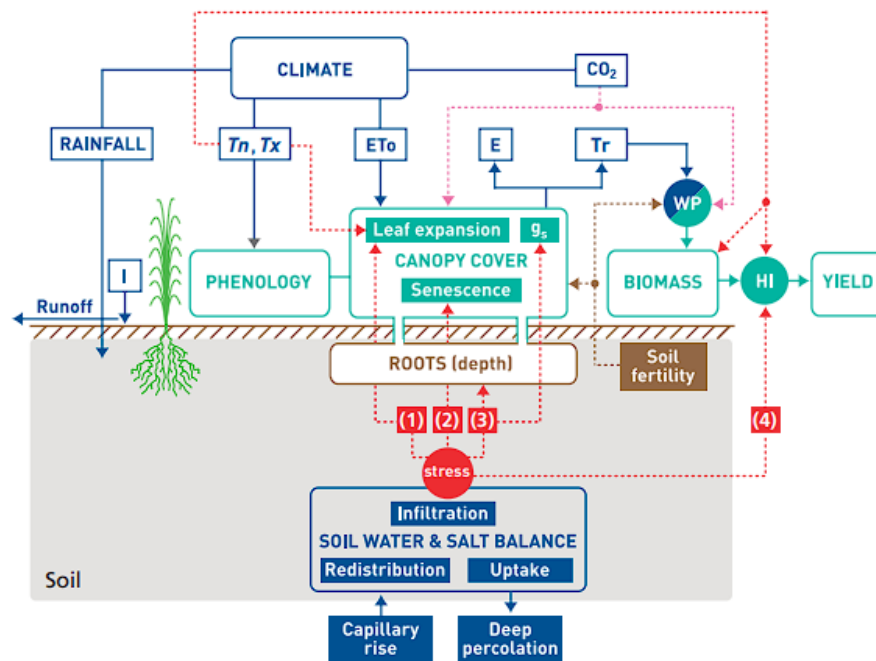
2.4. Penggunaan *Aquacrop* Untuk Melihat Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Padi

AquaCrop adalah model produktivitas tanaman yang dapat digunakan untuk mensimulasikan respons hasil tanaman yang berbeda terhadap air di bawah kondisi lingkungan dan pengelolaan yang berbeda. *AquaCrop* menggunakan pendekatan berbasis proses untuk memodelkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman, dan memperhitungkan efek tekanan air pada produksi tanaman. Model tersebut mensimulasikan neraca air tanaman, dengan mempertimbangkan faktor-

faktor seperti evapotranspirasi, kandungan air tanah, dan curah hujan (Steduto et al., 2012).

AquaCrop dirancang untuk mensimulasikan hasil yang dapat dicapai dari tanaman dengan mempertimbangkan konsumsi air pada kondisi irigasi yang berbeda, termasuk tadah hujan, tambahan, defisit, dan irigasi penuh. Model beroperasi berdasarkan simulasi pertumbuhan dimana air merupakan komponen utama, di mana transpirasi awalnya dihitung dan kemudian diubah menjadi biomassa menggunakan parameter spesifik tanaman yang dikenal sebagai produktivitas air. Parameter ini dinormalisasi untuk memperhitungkan permintaan penguapan atmosfer dan konsentrasi CO₂ di udara, membuat *AquaCrop* dapat diterapkan di berbagai lokasi dan musim. Simulasi dapat dilakukan berdasarkan waktu termal atau waktu kalender, dalam hitungan harian. *AquaCrop* menggunakan kanopi penutup tanah untuk memperkirakan transpirasi dan membedakannya dari penguapan tanah.

AquaCrop menggabungkan empat variabel untuk mensimulasikan respons tanaman terhadap defisit air, yang dipengaruhi oleh ketersediaan air tanah dan permintaan evaporatif. Variabel ini diantaranya: ekspansi kanopi, kontrol transpirasi stomata, penuaan kanopi, dan indeks panen. *AquaCrop* bertujuan untuk mempertahankan kesederhanaan, akurasi, dan ketahanan dengan menggunakan sejumlah kecil parameter eksplisit dan intuitif (Steduto et al., 2009). Gambar 3 mengilustrasikan komponen kunci dari sistem hubungan antara tanah, tanaman, atmosfer dan faktor-faktor yang mempengaruhi fenologi, tutupan kanopi, transpirasi, produksi biomassa, dan hasil. Garis padat mewakili hubungan langsung antara variabel dan proses, sedangkan garis putus-putus menunjukkan putaran umpan balik (Steduto et al., 2012).



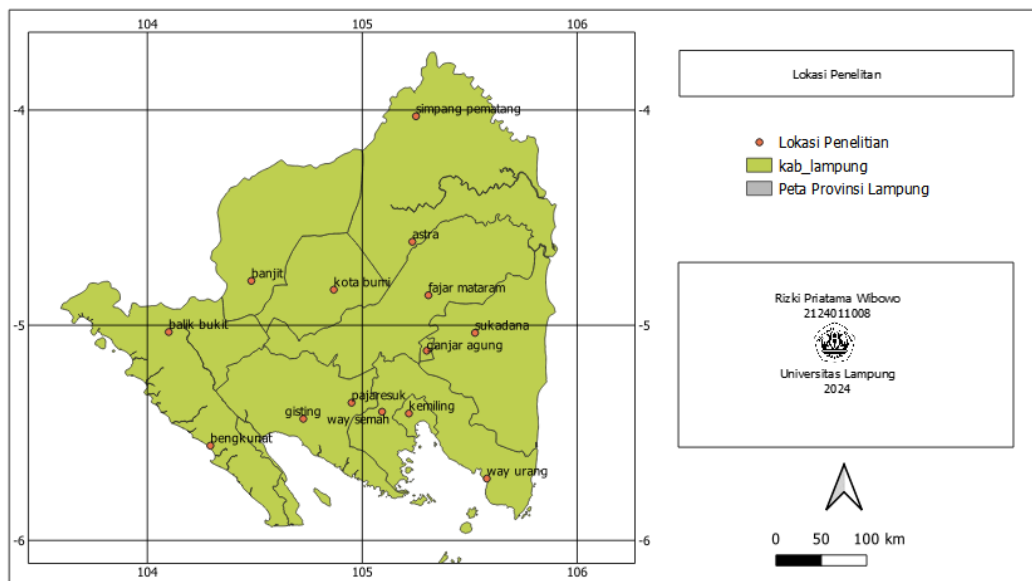
Gambar 3. Bagan komponen *AquaCrop*

Simulasi tanaman merupakan tahapan penting untuk menghitung pengaruh perubahan iklim terhadap produksi tanaman. Model *AquaCrop* memungkinkan evaluasi respons tanaman di bawah berbagai skenario perubahan iklim, dengan mempertimbangkan perubahan ketersediaan air, pola suhu, dan peningkatan kadar karbon dioksida di atmosfer. Hal ini mensimulasikan pertumbuhan tanaman, produktivitas, dan pemanfaatan air setiap hari, dengan mempertimbangkan dampak perubahan kondisi lingkungan dan ketersediaan air. Model ini telah menjalani kalibrasi dan pengujian, dengan hasil yang meyakinkan akan kinerja dan keandalannya. Hal ini dilakukan untuk optimalisasi jadwal irigasi dan peningkatan strategi manajemen untuk meningkatkan produktivitas dan penghematan air dimasa mendatang (Steduto et al., 2012)

III. BAHAN DAN METODE

3.1. Tempat dan Waktu

Wilayah yang akan diteliti adalah 15 lokasi yang mewakili masing-masing kabupaten di Provinsi Lampung. Pemilihan lokasi berdasarkan ketersediaan data curah hujan yang lengkap pada periode 2011-2022 yang digunakan untuk penyesuaian parameter *AquaCrop*.



Gambar 4. Lokasi Penelitian

Simulasi pada AquaCrop dilakukan sebanyak 3 rentang waktu, yaitu periode historis dengan menggunakan data iklim tahun 2011 hingga 2022. Periode baseline berdasarkan data Marksim Weather Generator, dimana data baseline merupakan data iklim tahun 1985 sebagai acuan kondisi saat ini. Sedangkan periode masa depan yaitu tahun 2050 berdasarkan skenario perubahan iklim RCP 4.5 dan RCP 8.5.

Tabel 1. Lokasi Penelitian

No	Lokasi Pos Hujan	Kecamatan	Kabupaten	Lintang	Bujur
1	Astra	Menggala	Tulang Bawang	-4.613	105.236
2	Balik Bukit	Balik Bukit	Lampung Barat	-5.033	104.101
3	Banjit	Banjit	Way Kanan	-4.795	104.486
4	Bengkunat	Bengkunan	Pesisir Barat	-5.562	104.295
5	Fajar Mataram	Seputih Mataram	Lampung Tengah	-4.862	105.311
6	Ganjar Agung	Metro Barat	Metro	-5.12	105.303
7	Gisting	Gisting	Tanggamus	-5.437	104.728
8	Kemiling	Kemiling	Bandar Lampung	-5.412	105.22
9	Pajaresuk	Pringsewu	Pringsewu	-5.362	104.953
10	Simpang Pematang	Simpang Pematang	Mesuji	-4.029	105.253
11	sukadana	Sukadana	Lampung Timur	-5.037	105.528
12	way semah	Gedong Tataan	Pesawaran	-5.404	105.095
13	Way Urang	Kalianda	Lampung Selatan	-5.715	105.583
14	Kota Bumi	Kota Bumi	Lampung Utara	-4.836,	104.870
15	Panaragan Jaya	Tulang Bawang Tengah	Tulang Bawang Barat	-4.511	105.091

3.2. Bahan dan Alat

3.2.1. Sumber data

1. Data suhu udara rata-rata tahun 1976-2022 dari BMKG Stasiun Meteorologi Radin Inten II Lampung
2. Data observasi berupa data curah hujan harian tahun 2011-2022 dari 15 pos hujan dari masing-masing kabupaten di Provinsi Lampung
3. Data suhu udara maksimum dan minimum tahun 2011-2022 bersumber dari BMKG Stasiun Klimatologi Lampung
4. Data model suhu maksimum, minimum, radiasi matahari dan curah hujan kondisi saat ini (*baseline*) bersumber dari data satelit pada *The Marksim Weather Generator* yang di unduh pada setiap lokasi penelitian melalui: <http://gisweb.ciat.cgiar.org/MARKSIMGCM/>
5. Data model suhu maksimum, minimum, radiasi matahari dan curah hujan proyeksi RCP 4.5 dan RCP 8.5 tahun 2050 bersumber dari *The Marksim Weather Generator* yang di unduh pada setiap lokasi penelitian: <http://gisweb.ciat.cgiar.org/MARKSIMGCM/>
6. Data CO₂ pada skenario perubahan iklim bersumber dari IPCC yang sudah tersedia pada *AquaCrop* <https://www.fao.org/AquaCrop>. Sedangkan data CO₂ historis tahun 2004-2021 berasal dari Stasiun Global Atmosphere Watch Kototabang, Sumatra Barat.
7. Data produktivitas padi tahun 1976-2022 bersumber dari BPS Provinsi Lampung
8. Data sampel tanah sawah diambil dari beberapa lokasi. Sampel tanah tersebut akan dianalisa di laboratorium Tanah (Unila atau Polinela) untuk mengetahui tekstur dan sifat fisik tanah.

3.2.2. Analisa data

3.2.2.1. Kenaikan Suhu Udara

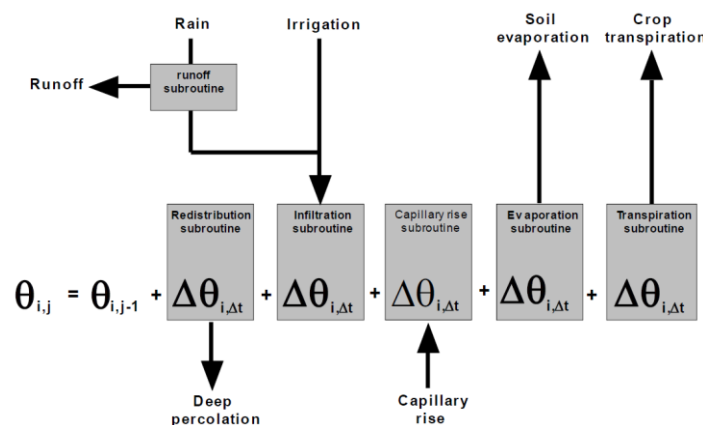
Analisa tren untuk melihat indikator perubahan iklim berupa kenaikan suhu udara rata-rata dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel*.

3.2.2.2. Perubahan Laju Evapotranspirasi Dan Neraca Air Tanaman

Perhitungan laju evapotranspirasi referensi (ET_o) dihitung aplikasi ETo *Calculation* yang terdapat pada *AquaCrop*. Eto Calculation dihitung berdasarkan parameter iklim yang akan di masukkan pada aplikasi berupa radiasi matahari, suhu udara maksimum dan minimum. Parameter kecepatan angin pada ketinggian 2 meter diasumsikan tetap dengan kecepatan 2 m/detik dan kelembaban udara relatif diasumsikan tetap berdasarkan lokasi (*semi humid-humid area*).

Evapotranspirasi referensi diestimasi menggunakan Perhitungan evapotranspirasi referensi menggunakan metode FAO Penman-Monteith yang merupakan standar dalam menghitung evapotranspirasi referensi.

Dalam simulasi *AquaCrop*, perhitungan neraca air tanah melibatkan serangkaian proses yang melibatkan beberapa parameter diantaranya curah hujan, irigasi, perkolasi dalam, infiltrasi, kapilaritas naik, evaporasi tanah dan transpirasi tanaman. Simulasi dimulai dengan drainase profil tanah. Selanjutnya air berinfiltrasi ke dalam profil tanah (setelah pengurangan limpasan permukaan), dan bergerak ke atas dengan kenaikan kapiler dari permukaan air tanah yang dangkal. Akhirnya jumlah air yang hilang oleh penguapan tanah dan transpirasi tanaman dihitung. Variasi kandungan air akhir pada akhir langkah waktu adalah hasil dari berbagai proses yang dijelaskan dalam proses yang berbeda.



Gambar 5. Skema neraca air tanaman pada *AquaCrop*

Perhitungan *AquaCrop* menggunakan parameter evapotranspirasi relatif sebagai indikator akhir pada neraca air tanah. Evapotranspirasi relatif merupakan

prosentase antara evapotranspirasi aktual (E_a) dibandingkan dengan evapotranspirasi maksimum (ET) tanaman. Selama air tanah tersedia untuk tanaman, maka $E_a = E_x$. Ketika tingkat kelembaban tanah kritis tercapai, yang didefinisikan sebagai sebagian kecil dari total kandungan air tanah yang tersedia, transpirasi berkurang karena penutupan stomata sehingga $E_a < E_x$, hingga tingkat air tanah di zona akar mencapai tingkat permanen.

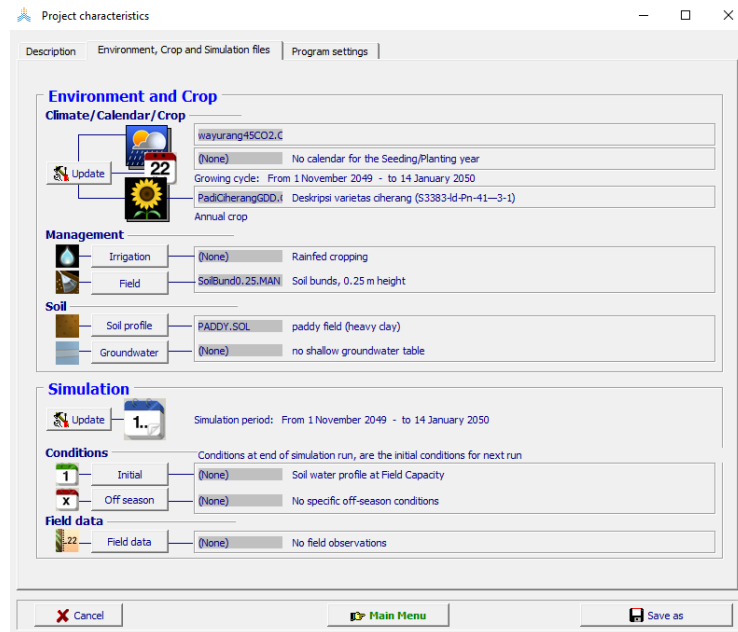
3.2.2.3. Validasi Model *AquaCrop* Untuk Simulasi Hasil

Langkah pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah menjalankan simulasi *AquaCrop* berdasarkan data historis menggunakan data hasil observasi pada masing-masing lokasi penelitian pada tahun 2011 hingga 2022. Hasil produktivitas padi lalu dibandingkan dengan data aktual yang diperoleh dari BPS. Perhitungan statistik Root Mean Square Error (RMSE) antara produktivitas aktual dengan produktivitas rata-rata per kabupaten dilakukan untuk mengkalibrasi parameter tanaman pada *AquaCrop*. *Trial dan error* merubah parameter tanaman dilakukan hingga mendapatkan perbandingan antara produktivitas keluaran model dengan produktivitas aktual dengan RMSE terkecil.

Kemudian simulasi *AquaCrop* dijalankan dengan menggunakan data *baseline* (rata-rata tahun 1975-2005) atau kondisi klimatologi pada saat ini dari *The Marksim Weather Generator* pada masing-masing lokasi penelitian. Data *baseline* ini berupa data curah hujan, suhu udara maksimum, suhu udara minimum serta radiasi matahari harian selama satu tahun. Selanjutnya untuk mengetahui bagaimana kondisi di masa mendatang, dilakukan simulasi *AquaCrop* menggunakan data klimatologi RCP 4.5 dan RCP 8.5 dari *The Marksim Weather Generator*.

3.3 Pelaksanaan Penelitian

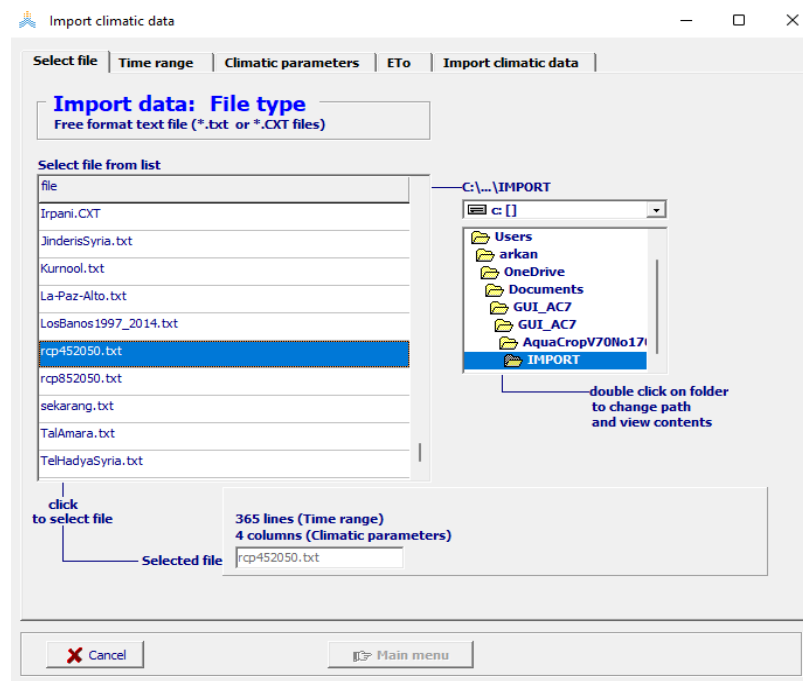
Simulasi AquaCrop dilakukan dengan menggunakan 3 periode data, periode historis (2011-2022), periode baseline, dan periode tahun 2050. Berikut merupakan tahapan pelaksanaan simulasi dari *AquaCrop*:



Gambar 6. Menu halaman muka *AquaCrop*

1. Langkah awal yang perlu disiapkan adalah mempersiapkan data iklim yang diperlukan. Data iklim tersebut lalu diurutkan mulai dari tanggal 1 Januari hingga 31 desember dengan format text (*.txt). dengan urutan radiasi matahari, suhu maksimum, suhu minimum dan curah hujan. Urutan data disesuaikan dengan panjang data, misal untuk data historis, data diurutkan sepanjang data (4748 baris), data baseline (365 baris) dan data skenario RCP 4.5 dan RCP 8.8 (370 baris) karena dimulai dari tahun 2049 untuk simulasi musim tanan November.
2. Mengunduh aplikasi AquaCrop yang didapat dari <https://www.fao.org/aquacrop/en/>, dalam hal ini penulis menggunakan AquaCrop versi 7.0 tahun 2022.
3. Melakukan impor data klimatologi yang sudah disiapkan. Data klimatologi yang telah di unduh dari *The Marksim Weather Generator* berupa curah hujan harian, suhu udara dimasukkan melalui import climate file pada

perangkat lunak *AquaCrop* sesuai dengan lokasi titik penelitian dan tahun yang diinginkan. Data klimatologi yang dimasukkan berupa data harian mulai tanggal 1 Januari hingga 31 Desember. Data evapotranspirasi (ET_o) juga dihitung pada tahapan ini dengan masukan berupa suhu udara dan radiasi matahari, sedangkan kelembaban udara dan kecepatan angin di estimasi berdasarkan data di *AquaCrop*. Koordinat lokasi penelitian dan ketinggian tempat juga turut dimasukkan pada perhitungan ini.

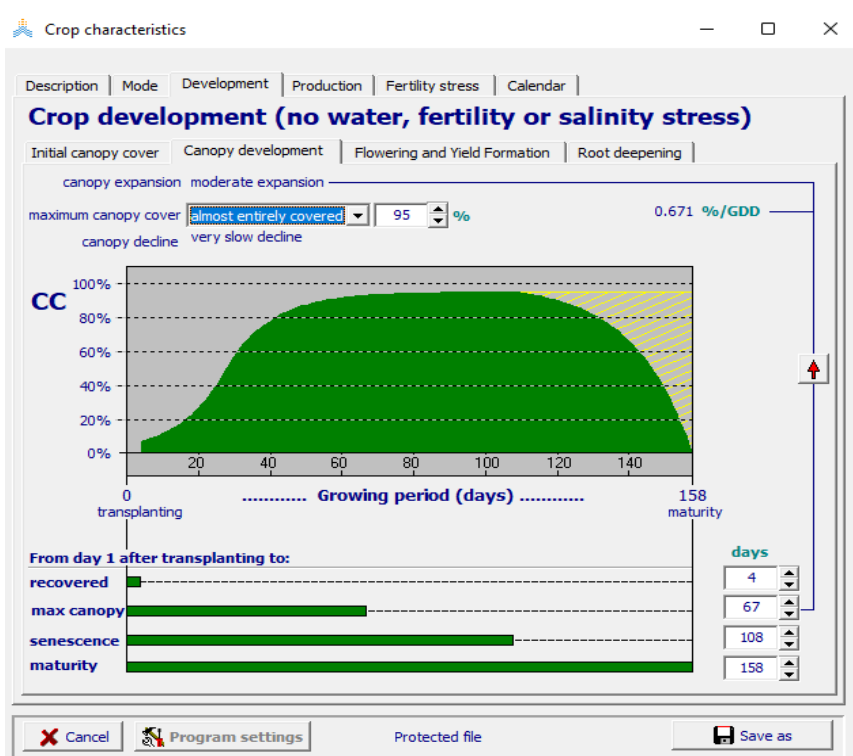


Gambar 7. Menu import data klimatologi

4. Melakukan pemilihan parameter tanaman padi. Tanaman padi yang dipilih yang dipilih pada perangkat lunak *AquaCrop* ini adalah PaddyRiceGDD.CRO, yang kemudian disesuaikan parameternya dengan jenis tanaman padi yang umumnya ditanam di Provinsi Lampung yaitu padi Ciherang. Parameter yang disesuaikan adalah produktivitas (ton/ha) dan umur tanaman padi berdasarkan buku deskripsi varietas unggul tanaman padi (Thamrin et al., 2023). Berikut adalah parameter yang disesuaikan:

Tabel 2. Parameter padi yang disesuaikan menurut deskripsi varietas unggul tanaman padi 2023

Parameter	PaddyRiceGDD.CRO	PadiciherangGDD.CRO
Max Canopy	67 hari	55 hari
Senescence	108 hari	85 hari
Maturity	158 hari	120 hari
Dry Biomass	22.9 ton/ha	18.6 ton/ha
Dry Yield	9.8 ton/ha	8.0 ton/ha
Fresh Yield	10.9 ton/ha	8.9 ton/ha

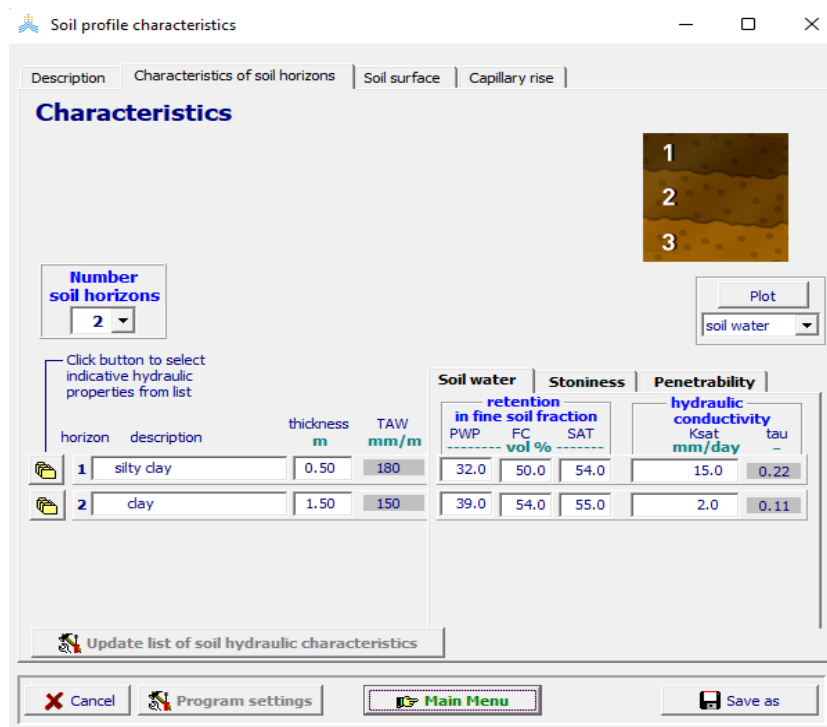


Gambar 8. Parameter Crop pada AquaCrop

5. Melakukan penyesuaian manajemen irigasi. Pada penelitian ini diasumsikan selama periode simulasi tanaman padi hanya menggunakan air dari curah hujan tanpa irigasi, sehingga dipilih profil irigasi Rainfed cropping.
6. Melakukan penyesuaian manajemen lapang. Pada penelitian ini dipilih

manajemen lapang berupa soil bund atau galangan sawah dengan ketinggian 0.25m yang mencegah limpasan air dan menyimpan kelebihan air. Parameter manajemen gulma dipilih yang baik, sedangkan parameter lainnya dibiarkan secara default dari *AquaCrop*.

- Melakukan penyesuaian profil tanah. Profil tanah yang digunakan adalah PADDY.SOL yang dilakukan penyesuaian karakteristik profil tanahnya berupa titik layu permanen (PWP) dan kapasitas lapang (FC) dari data sampel tanah di lapangan.



Gambar 9. Parameter tanah pada *AquaCrop*

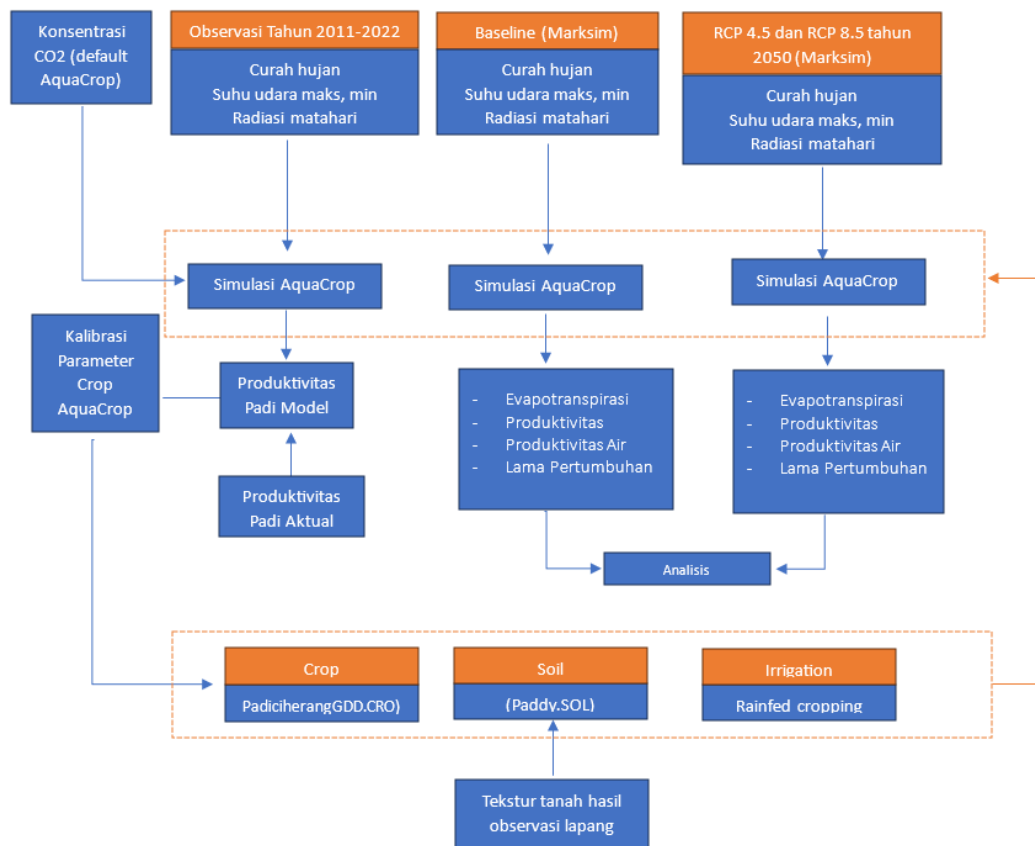
- Pelaksanaan simulasi

Simulasi *AquaCrop* dilakukan berdasarkan data historis dilakukan untuk mengetahui bagaimana perbandingan produktivitas padi antara model *AquaCrop* dan data aktual di lapangan. Simulasi ini dijalankan selama 11 tahun dari tahun 2011 hingga 2022 sesuai dengan ketersediaan data iklim dan data aktual yang tersedia.

Simulasi dilakukan sebanyak dua kali dalam setahun yaitu musim tanam utama pada tanggal 1 November yang mewakili penanaman pada musim hujan dan musim tanam gadu pada tanggal 1 April. Rata-rata dari

produktivitas musim tanam utama dan musim tanam gadu merupakan nilai produktivitas pada tahun berjalan.

Berikut merupakan diagram alur penelitian yang akan dilakukan:



Gambar 10. Diagram alur penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

1. Berdasarkan data historis (1976-2022), terjadi tren kenaikan suhu udara rata-rata sebesar $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 10 tahun, atau total kenaikan sebesar $1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 46 tahun, yang menjadi bukti adanya perubahan iklim di Provinsi Lampung. Proyeksi ke tahun 2050 menunjukkan peningkatan suhu udara sebesar $+1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada skenario RCP 4.5 dan $+1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada skenario RCP 8.5, dibandingkan dengan baseline (1975-2005). Curah hujan pada musim kemarau (Juni-September) mengalami penurunan sebesar -41.7 mm/bulan pada RCP 4.5 dan -52.3 mm/bulan pada RCP 8.5 terhadap *baseline*. Sedangkan pada awal musim hujan (Oktober-Desember) pada RCP 4.5 sebesar -101.8 mm/bulan dan pada RCP 8.5 sebesar -108.9 mm/bulan . Hal ini menunjukkan bahwa musim kemarau menjadi semakin kering dan panjang dan menggeser awal musim hujan yang sebelumnya di bulan Oktober, menjadi bulan Desember atau mundur 2 bulan.
2. Berdasarkan hasil simulasi *AquaCrop* menggunakan data iklim historis (2011-2022) dibandingkan data produktivitas padi aktual, model *AquaCrop* mampu mensimulasikan produktivitas padi dengan baik di Provinsi Lampung, walaupun secara umum produktivitas keluaran model lebih rendah dibandingkan dengan produktivitas aktual. Hal tersebut dikarenakan pada model *AquaCrop* menggunakan sistem pengairan tadah hujan, sedangkan data aktual menggunakan sistem pengairan campuran antara irigasi dan tadah hujan.
3. Sebagai dampak dari peningkatan suhu udara, laju evapotranspirasi diperkirakan meningkat pada bulan Juni hingga Januari sebesar $+28\text{ mm/bulan}$ pada skenario RCP 8.5 dan $+25\text{ mm/bulan}$ pada skenario RCP

4.5 dibandingkan dengan baseline, yang berakibat pada defisit neraca air tanaman selama bulan Juni hingga November. Produktivitas air diperkirakan mengalami penurunan sebesar $-0.3 \text{ kg(hasil)/m}^3$ air pada skenario RCP 4.5 dan $-0.4 \text{ kg(hasil)/m}^3$ air pada skenario RCP 8.5, sementara fase pertumbuhan tanaman padi menjadi semakin singkat sebanyak 1-7 hari dibandingkan baseline. Pada musim tanam bulan April, produksi padi diperkirakan meningkat pada skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5 masing-masing sebesar $+0.25$ dan $+0.74 \text{ ton/ha}$. Hal ini terjadi karena curah hujan tidak mengalami banyak perubahan dan peningkatan kadar CO_2 yang dapat meningkatkan produktivitas tanaman. Namun, pada musim tanam bulan November, produktivitas padi diperkirakan menurun pada skenario RCP 4.5 dan RCP 8.5 masing-masing sebesar -0.41 dan -0.75 ton/ha akibat rendahnya curah hujan di bulan tersebut. Perubahan jadwal tanam yang semula November, menjadi Desember dapat meningkatkan produktivitas padi secara signifikan, dengan peningkatan sebesar $+1.3 \text{ ton/ha}$ pada RCP 4.5 dan $+1.8 \text{ ton/ha}$ pada RCP 8.5. Perubahan jadwal tanam ini cukup efektif sebagai adaptasi terhadap perubahan iklim pada tahun 2050.

5.2. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan data iklim model proyeksi yang berbeda atau menggunakan proyeksi yang terbaru seperti Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)
2. Perlu dilakukan penelitian secara spasial dengan titik lokasi yang lebih rapat untuk resolusi kajian yang lebih baik
3. Perlu dilakukan kalibrasi *AquaCrop* berdasarkan parameter lapangan yang lebih banyak untuk mendapatkan hasil simulasi tanaman yang lebih baik dan mendekati data aktual.

DAFTAR PUSTAKA

- Abtew, W., & Melesse, A. (2013). *Evaporation and evapotranspiration: Measurements and estimations*. In *Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations* (Vol. 9789400747). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4737-1>
- Achyadi, M. A., Ohgushi, K., Morita, T., Thin, S. W., & Kawahara, W. (2019). *Climate Change Impact On Irrigation Water Requirement In Barito Kuala South Kalimantan Indonesia*. Proceedings of the IAHR World Congress. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0878>
- Agnese, F., & Othman, Z. (2019). *Response To Climate Change Impact On Paddy Farming: The System Of Rice Intensification (Sri)*. *Journal of Technology and Operations Management*, 14(Number 1). <https://doi.org/10.32890/jtom2019.14.1.5>
- Aldrian, E., & Dwi Susanto, R. (2003). *Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature*. *International Journal of Climatology*, 23(12). <https://doi.org/10.1002/joc.950>
- Ali, S., Ghosh, B. C., Osmani, A. G., Hossain, E., & Fogarassy, C. (2021). *Farmers' climate change adaptation strategies for reducing the risk of rice production: Evidence from rajshahi district in bangladesh*. *Agronomy*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030600>
- Ansari, A., Lin, Y. P., & Lur, H. S. (2021). *Evaluating and adapting climate change impacts on rice production in indonesia: A case study of the keduang subwatershed, Central Java*. *Environments - MDPI*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/environments8110117>
- Aswathi, K. P., Ajith, K., Ajithkumar, B., & Abida, P. S. (2022). *Impact of climate change on rice yield under projected scenarios in central zone of Kerala*. *Journal of Agrometeorology*, 24(3). <https://doi.org/10.54386/jam.v24i3.1544>
- Boonwichai, S., Shrestha, S., Babel, M. S., Weesakul, S., & Datta, A. (2018). *Climate change impacts on irrigation water requirement, crop water productivity and rice yield in the Songkhram River Basin, Thailand*. *Journal of Cleaner Production*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.146>
- BPS. (2023). *Provinsi Lampung Dalam Angka 2023* (E. Subiyandini, Ed.). BPS ProvinsiLampung.
- BPS. (2024a, October 12). *Rata-Rata Konsumsi per Kapita Seminggu Beberapa Macam Bahan Makanan Penting, 2007-2023*. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/OTUwIzE=/rata-rata-konsumsi-per-kapita-seminggu-beberapa-macam-bahan-makanan-penting--2007-2023.html>

- BPS. (2024b, October 14). *Sensus Penduduk 2020*.
<https://sensus.bps.go.id/main/index/sp2020>
- Chau, T. N., & Scrimgeour, F. (2021). *Productivity Impacts of Hybrid Rice Seeds in Vietnam*. *Journal of Agricultural Economics*, 73(2), 414–429.
<https://doi.org/10.1111/1477-9552.12458>
- Chen, H., Wu, Y. C., & Teng, C. Y. (2023). *Temporal variation of the relationships between rice yield and climate variables since 1925*. *PeerJ*, 9.
<https://doi.org/10.7717/peerj.16045>
- Dairina, I., & Harini, R. (2024). *Cropland Conversion and Its Effect on Rice Production in Lampung Province, Indonesia*. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1313(1), 12030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1313/1/012030>
- Duncan, J. M., Tompkins, E. L., Dash, J., & Tripathy, B. (2017). *Resilience to hazards: Rice farmers in the Mahanadi Delta, India*. *Ecology and Society*, 22(4).
<https://doi.org/10.5751/ES-09559-220403>
- Dybro, N., & Hansen, A. C. (2018). *Sustainable Intensification of Global Agronomic Output*. *Journal of Agricultural Science*, 10(3). <https://doi.org/10.5539/jas.v10n3p30>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). *Strategies for mitigation of climate change: a review*. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 18, Issue 6).
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Fenta Mekonnen, D., & Disse, M. (2018). *Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4). <https://doi.org/10.5194/hess-22-2391-2018>
- Forestieri, A., Arnone, E., Blenkinsop, S., Candela, A., Fowler, H. J., & Noto, L. (2018). *The Impact of Climate Change on Extreme Precipitation in Sicily, Italy*. *Hydrological Processes*, 32(3), 332–348. <https://doi.org/10.1002/hyp.11421>
- Giarno, G., Dupe, Z. L., & Mustofa, M. A. (2012). *Kajian Awal Musim Hujan Dan Awal Musim Kemarau Di Indonesia*. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 13(1).
<https://doi.org/10.31172/jmg.v13i1.113>
- Gupta, M. K., & Sharif, M. (2021). *Spatio-temporal analysis of temperature projections based on representative concentration pathways for Satluj River Basin, India*. *Cogent Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1933683>
- Hariyono, D., Putri, R. A., Saitama, A., Sandy, Y. A., & Zaini, A. H. (2023). *Water Balance Analysis for Determination of Time Shift in Rice (Oryza sativa L.)*. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 8(4).
<https://doi.org/10.22161/ijeab.84.14>
- Harvian, K. A., & Yuhan, R. J. (2021). *Kajian Perubahan Iklim Terhadap Ketahanan Pangan*. *Seminar Nasional Official Statistics*, 2020(1).
<https://doi.org/10.34123/semnasoffstat.v2020i1.593>
- Hodson, T. O. (2022). *Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not*. In *Geoscientific Model Development* (Vol. 15, Issue 14).
<https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

- Hordofa, A. T., Leta, O. T., Alamirew, T., & Chukalla, A. D. (2022). *Spatiotemporal Trend Analysis of Temperature and Rainfall over Ziway Lake Basin, Ethiopia*. *Hydrology*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology9010002>
- Houma, A. A., Kamal, M. R., Mojid, M. A., Zawawi, M. A. M., & Rehan, B. M. (2021). *Predicting climate change impact on water productivity of irrigated rice in malaysia using fao-aquacrop model*. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311253>
- Hussain, S., Khaliq, A., Ali, B., Hussain, H. A., Qadir, T., & Hussain, S. (2019). *Temperature extremes: Impact on rice growth and development*. In *Plant Abiotic Stress Tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_6
- IPCC. (2015). *Summary for Policymakers*. In *Global Warming of 1.5°C* (pp. 1–24). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Jones, P. G., & Thornton, P. K. (2013). *Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications*. *Agricultural Systems*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002>
- Katzenberger, A., & Levermann, A. (2023). *Consistent Increase of East Asian Summer Monsoon Rainfall and Its Variability Under Climate Change Over China in 34 Coupled Climate Models*. <https://doi.org/10.5194/esd-2023-19>
- Khan, M. A., Tahir, A., Khurshid, N., ul Husnain, M. I., Ahmed, M., & Boughanmi, H. (2020). *Economic effects of climate change-induced loss of agricultural production by 2050: A case study of Pakistan*. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/su12031216>
- Khanal, P. R. (2021). *Water, Food Security and Asian Transition: A New Perspective Within the Face of Climate Change*. In Springer Water. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54612-4_1
- Kumar, V., Sharma, A., Soni, J. K., & Pawar, N. (2017). *Physiological Response of C3, C4 and CAM Plants in Changeable Climate*. *The Pharma Innovation Journal*, 6(9).
- Kusumastuty, N. A. E., Manik, T. K., & Timotiwu, P. B. (2021). *Identification of temperature and rainfall pattern in Bandar Lampung and the 2020-2049 projection*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 739(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/739/1/012045>
- Liu, S., Waqas, M. A., Wang, S. H., Xiong, X. Y., & Wan, Y. F. (2017). *Effects of increased levels of atmospheric CO2 and high temperatures on rice growth and quality*. *PLoS ONE*, 12(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187724>
- Loo, Y. Y., Billa, L., & Singh, A. (2015). *Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia*. *Geoscience Frontiers*, 6(6). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>
- Manik, T. K., Rosadi, B., & Nurhayati, E. (2014). *Mengkaji Dampak Perubahan Iklim Terhadap Distribusi Curah Hujan Lokal di Propinsi Lampung*. *Forum Geografi*, 28(1).

- McNally, K. L., & Henry, A. (2023). *Tools for using the International Rice Genebank to breed for climate-resilient varieties*. PLoS Biology, 21(7 July).
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002215>
- Onyeneke, R. U., Amadi, M. U., Njoku, C. L., & Osuji, E. E. (2021). *Climate change perception and uptake of climate-smart agriculture in rice production in ebonyi state, nigeria*. Atmosphere, 12(11). <https://doi.org/10.3390/atmos12111503>
- Ou, T., Chen, D., Linderholm, H. W., & Jeong, J. (2013). *Evaluation of Global Climate Models in Simulating Extreme Precipitation in China*. Tellus a Dynamic Meteorology and Oceanography, 65(1), 19799.
<https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.19799>
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. a., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., ... van Ypersele, J.-P. (2014). IPCC, 2014. *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers*.
- Parmar, R., Kollah, B., Devi, M. H., Trivedi, S. K., Gupta, S. C., & Mohanty, S. R. (2024). *Effect of Elevated CO₂ and Temperature on Chlorophyll Content and Growth Attributes of Rice-Wheat Cropping System in Central India*. International Journal of Environment and Climate Change, 14(5), 375–385.
<https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i54197>
- Patel, C., Nema, A. K., Singh, R. S., Yadav, M. K., Singh, K. K., Singh, S. K., Rai, P. K., & Singh, S. M. (2018). *Assessment of climate change impact on wheat crop using MarkSim GCM in Varanasi, Uttar Pradesh*. Journal of Agrometeorology, 20(3).
- Pereira, J., Revi, A., Rose, S., Sanchez-Rodriguez, R., Lisa Schipper Sweden, E. F., Schmidt, D. U., Schoeman, D., Shaw, R., Singh, C., Solecki, W., & Stringer, L. (2022). *IPCC Report 2022*. International Panel on Climate Change.
- Pingale, B. N., Singh, S. D., & Yadav, A. (2017). *Potential impacts of increasing atmospheric carbon dioxide on yield and plant growth of rice (Oryza sativa) and maize (Zea mays) crops*. Indian Journal of Agricultural Sciences, 87(8).
<https://doi.org/10.56093/ijas.v87i8.73235>
- Raghavan, R., Rao, K. V., Shirahatti, M. S., Srinivas, D. K., Reddy, K. S., Chary, G. R., Gopinath, K. A., Osman, M., Prabhakar, M., & Singh, V. K. (2022). *Assessment of Spatial and Temporal Variations in Runoff Potential under Changing Climatic Scenarios in Northern Part of Karnataka in India Using Geospatial Techniques*. Sustainability (Switzerland), 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14073969>
- Raj, S., Roodbar, S., Brinkley, C., & Wolfe, D. W. (2022). *Food Security and Climate Change: Differences in Impacts and Adaptation Strategies for Rural Communities in the Global South and North*. In Frontiers in Sustainable Food Systems (Vol. 5).
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.691191>
- Rajasivaranjan, T., Anandhi, A., Patel, N. R., Irannezhad, M., Srinivas, C. V., Veluswamy, K., Surendran, U., & Raja, P. (2022). *Integrated use of regional weather forecasting and crop modeling for water stress assessment on rice yield*. Scientific Reports, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-19750-z>

- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., & Rafaj, P. (2011). *RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions*. *Climatic Change*, 109(1).
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Ruminta, R. (2016). *Analisis penurunan produksi tanaman padi akibat perubahan iklim di Kabupaten Bandung Jawa Barat*. *Kultivasi*, 15(1).
<https://doi.org/10.24198/kultivasi.v15i1.12006>
- Ruminta, R., Handoko, H., & Nurmala, T. (2018). *Indikasi perubahan iklim dan dampaknya terhadap produksi padi di Indonesia (Studi kasus : Sumatera Selatan dan Malang Raya)*. *Jurnal AGRO*, 5(1). <https://doi.org/10.15575/1607>
- Ruslan, K., & Prasetyo, O. R. (2023). *Can Paddy Growing Phase Produce an Accurate Forecast of Paddy Harvested Area in Indonesia? Analysis of the Area Sampling Frame Results*. *Proceedings of the International Conference on Data Science and Official Statistics*, 2023(1), 746–755. <https://doi.org/10.34123/icdsos.v2023i1.316>
- Sadana, U. S., & Nayyar, V. K. (2000). *Amelioration of iron deficiency in rice and transformations of soil iron in coarse textured soils of Punjab, India*. *Journal of Plant Nutrition*, 23(11–12). <https://doi.org/10.1080/01904160009382165>
- Shi, J., An, G., Weber, A. P. M., & Zhang, D. (2023). *Prospects for rice in 2050*. In *Plant Cell and Environment* (Vol. 46, Issue 4). <https://doi.org/10.1111/pce.14565>
- Shrestha, S., Deb, P., & Bui, T. T. T. (2016). *Adaptation strategies for rice cultivation under climate change in Central Vietnam*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(1). <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9567-2>
- Slameto, Meidaliyantisyah, & Irawati, A. (2021). *Growth and yield of several rice varieties in swampland agroecosystems in Mesuji Regency, Lampung Province*. *E3S Web of Conferences*, 306. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130601042>
- Song, L., Chen, S., Chen, W., & Chen, X. (2016). *Distinct Impacts of Two Types of La Niña Events on Australian Summer Rainfall*. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2532–2544. <https://doi.org/10.1002/joc.4863>
- Sonko, E., Agodzo, S. K., & Antwi-Agyei, P. (2019). *Evaluating the Yield Response of Maize (*Zea mays* L.) and Rice (*Oryza sativa* L.) to Future Climate Variability in The Gambia*. *Journal of Agricultural Studies*, 7(2).
<https://doi.org/10.5296/jas.v7i2.14664>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (Vol. 1028). Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). *Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles*. *Agronomy Journal*, 101(3). <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Tangang, F., Chung, J. X., Juneng, L., Supari, Salimun, E., Ngai, S. T., Jamaluddin, A. F., Mohd, M. S. F., Cruz, F., Narisma, G., Santisirisomboon, J., Ngo-Duc, T., Van Tan, P., Singhruck, P., Gunawan, D., Aldrian, E., Sopaheluwakan, A., Grigory, N., Remedio, A. R. C., ... Kumar, P. (2020). *Projected future changes in rainfall in*

- Southeast Asia based on CORDEX-SEA multi-model simulations*. *Climate Dynamics*, 55(5–6). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05322-2>
- Thamrin, M., Hasmi, I., Ardhiyanti, S., Suhartini, Nugroho, N., Wening, R., Pramudyawardani, E., Nafisah, N., Usyati, N., Hikmah, Z., Handoko, D., & Norvyani, M. (2023). *Deskripsi Varietas Unggul Baru Padi*.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., & Edmonds, J. A. (2011). *RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100*. *Climatic Change*, 109(1). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- Tran, A. P., Rungee, J., Faybishenko, B., Dafflon, B., & Hubbard, S. S. (2019). *Assessment of spatiotemporal variability of evapotranspiration and its governing factors in a mountainous watershed*. *Water (Switzerland)*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/w11020243>
- Uçkan, İ. (2018). *Analysis of Solar Radiation Data in Van, Turkey*. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(4). <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.434552>
- Wang, W., Ding, Y., Shao, Q., Xu, J., Jiao, X., Luo, Y., & Yu, Z. (2017). *Bayesian multi-model projection of irrigation requirement and water use efficiency in three typical rice plantation region of China based on CMIP5*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.008>
- Yamaguchi, M., Tazoe, N., Nakayama, T., Yonekura, T., Izuta, T., & Kohno, Y. (2023). *Combined effects of elevated air temperature and CO₂ on growth, yield, and yield components of japonica rice (Oryza sativa L.)*. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00019-4>
- Yildiz, I. (2019). *Review of climate change issues: A forcing function perspective in agricultural and energy innovation*. *International Journal of Energy Research*, 43(6). <https://doi.org/10.1002/er.4435>
- Yuliawan, D., Hakim, D. B., Juanda, B., & Fauzi, A. (2022). *Integrated Rural Socio-Economic Vulnerability Analysis in Lampung Province*. *Jurnal Perspektif Pembiayaan Dan Pembangunan Daerah*, 10(3), 175–188. <https://doi.org/10.22437/ppd.v10i3.17591>
- Zhang, T., Huang, Y., & Yang, X. (2013). *Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice*. *Global Change Biology*, 19(2). <https://doi.org/10.1111/gcb.12057>
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J. L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., ... Asseng, S. (2017). *Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35). <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

Zúñiga, F., Jaime, M., & Salazar, C. (2021). *Crop farming adaptation to droughts in small-scale dryland agriculture in Chile*. *Water Resources and Economics*, 34. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2021.100176>