

**MENGELOLA RISIKO PERUBAHAN IKLIM PADA AIR IRIGASI
DI DAERAH KERING**

Wiwin Nurzanah¹, Yunita Pane¹, Irma Dewi¹

¹Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Jalan Kapten Muchtar Basri No.3 Medan. Telp.6622400

e-mail: wiwinnurzanah@umsu.ac.id, irmadewi@umsu.ac.id

ABSTRAK

Perubahan suhu, curah hujan, karbon dioksida di atmosfer, atau radiasi matahari yang tidak normal adalah contoh perubahan iklim yang dapat mempengaruhi kebutuhan air irigasi. Berkurangnya limpasan sungai dan pengisian ulang akuifer di cekungan Mediterania kemungkinan besar juga memperburuk kelangkaan air di lingkungan kering yang ada. Penelitian ini bertujuan untuk mengusulkan pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan merespons risiko perubahan iklim pada air irigasi di daerah kering dengan menggunakan proses Manajemen Risiko. Ruang lingkup dari penelitian ini adalah mengelola resiko perubahan iklim terhadap air irigasi di daerah kering dengan menggunakan Simulasi Monte Carlo. Metode penelitian yang dilakukan adalah pertama membuat daftar risiko perubahan iklim teridentifikasi. Melakukan analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap risiko yang teridentifikasi dan membuat tanggapan terhadap risiko-risiko yang telah diidentifikasi Hasil analisis risiko kuantitatif menunjukkan bahwa kerugian produksi tanaman akibat perubahan iklim diperkirakan sebesar 69%, 57%, dan 45% pada Tingkat kepercayaan masing-masing 90%, 50%, dan 10%. Fase terakhir dari proses manajemen risiko adalah respons risiko. Respons yang diusulkan terhadap risiko perubahan iklim mencakup strategi untuk menghindari, mentransfer, memitigasi, dan/atau menerima risiko-risiko tersebut. Penelitian ini telah memberikan tiga kontribusi. Pertama, mengadopsi metodologi manajemen risiko yang dikenal baik dalam studi perubahan iklim. Kedua, untuk mengukur dampak gabungan risiko perubahan iklim terhadap air irigasi di daerah kering. Ketiga, merekomendasikan serangkaian strategi respons untuk membantu pembuat kebijakan memitigasi dampak buruk perubahan iklim terhadap air irigasi.

Kata Kunci: Manajemen risiko, Perubahan iklim, Daerah kering, Simulasi Monte Carlo

ABSTRACT

Changes in temperature, precipitation, atmospheric carbon dioxide, or abnormal solar radiation are examples of climate changes that can affect irrigation water needs. Reduced river runoff and aquifer recharge in the Mediterranean basin are also likely to exacerbate water scarcity in existing arid environments This study aims to propose a systematic approach to identifying, analyzing, and responding to climate change risks to irrigation water in dry areas using the Risk Management process. The scope of this study is to use Monte Carlo simulation to manage climate change risks to irrigation water in dry areas. The first research method used is to make a list of identified climate change risks. Conduct qualitative and quantitative analysis of the identified risks and make responses to the identified risks. The results of the quantitative risk analysis indicate that crop production losses due to climate change are estimated at 69%, 57%, and 45% at 90%, 50%, and 10% confidence levels, respectively. The last phase of the risk management process is risk response. The proposed responses to climate change risks include strategies to avoid, transfer, mitigate, and/or accept these risks. This study has made three contributions. First, it adopts a well-known risk management methodology in climate change studies. Second, it measures the combined impact of climate change risks on irrigation water in dry areas. Third, it recommends a series of response strategies to help policymakers mitigate the adverse impacts of climate change on irrigation water.

Keywords: Risk Management, Climate change, Dry areas, Monte Carlo Simulation

PENDAHULUAN

Berkurangnya limpasan sungai dan pengisian ulang akuifer di cekungan Mediterania kemungkinan besar akan memperburuk kelangkaan air di lingkungan kering yang ada. Ketika suhu meningkat, kebutuhan air irigasi meningkat dan produktivitas pertanian menurun. Karena iklim yang memanas, puncak aliran sungai diperkirakan akan meningkat sebesar 50–400% dalam beberapa dekade mendatang, dan terjadi 2–4 bulan lebih awal setiap tahunnya (Liu *Z et al.*, 2021).

FAO merangkum tantangan yang dihadapi pertanian dan air dengan dan tanpa perubahan iklim. Salah satu tantangan utamanya adalah peningkatan suhu atmosfer global sebesar 4 °C pada tahun 2080, yang setara dengan efek peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer sebesar 200%. Suhu rata-rata diperkirakan akan meningkat lebih lambat di wilayah khatulistiwa dan lebih cepat di wilayah lintang atas. Curah hujan diperkirakan akan meningkat di wilayah lintang tinggi dan wilayah tropis, namun akan menurun di wilayah kering semi-kering hingga kering di wilayah lintang tengah dan di dalam benua. Model iklim memperkirakan bahwa pada tahun 2100, suhu global akan meningkat sebesar 4 °C dan curah hujan tahunan akan menurun sebesar 20% (Mostafa *et al.*, 2021b). Peningkatan suhu dapat meningkatkan laju evapotranspirasi potensial. Karenaantisipasi peningkatan laju transpirasi evapo pada tahun 2100, pengaruh perubahan iklim akan meningkatkan potensi kebutuhan irigasi di Mesir sekitar 6–16%. Studi di Sungai Nil Utara Mesir menunjukkan bahwa kebutuhan air tahunan untuk jagung dan gandum pada tahun 2040 masing-masing akan meningkat sebesar 2–15%, karena peningkatan potensi evapotranspirasi sebesar 8%. Permintaan air dari industri pertanian lokal diperkirakan akan meningkat seiring dengan perkiraan kenaikan suhu. Karenanya air yang diolah dari hasil limbah rumah tangga dapat digunakan untuk berbagai keperluan industri serta penggunaan sekunder seperti irigasi, pembilasan toilet, dan pencucian mobil (Nurzanah & Dewi, 2024). Di Portugal, kebutuhan irigasi musiman untuk tanaman yang sudah ada dan tanaman baru diperkirakan akan meningkat masing-masing sebesar 7–13% dan 13–70%. Studi lain pada tahun 2021 memperkirakan bahwa kebutuhan

air irigasi pada tahun 2050 untuk tanaman musim dingin dan tanaman musim panas akan meningkat masing-masing sebesar 7,3% dan 13,2% (Mostafa *et al.*, 2021a).

Sebuah studi global pada tahun 2007, didukung oleh studi lain pada tahun 2015, memperkirakan bahwa dampak perubahan iklim terhadap kebutuhan air irigasi dapat mengakibatkan peningkatan permintaan air irigasi dunia sebesar 20% dan penurunan produktivitas pertanian sebesar 10% pada tahun 2080. (Esteve *et al.*, 2015).

Selama periode 1980–2100, simulator hidrologi di Amerika Serikat menunjukkan peningkatan suhu rata-rata tahunan sebesar 3–5 °C, penurunan curah hujan tahunan sebesar 1,3%, penurunan debit sungai sebesar 8,5%, dan penurunan debit sungai sebesar 2–5%. penyimpanan air tanah, dan penurunan produktivitas tanaman di wilayah sungai sebesar 11% (Aliyari *et al.*, 2021). Para peneliti di Iran memperkirakan bahwa dampak perubahan iklim terhadap variabilitas hasil kentang akan berkisar antara 6 dan 29% (Shayanmehr *et al.*, 2020). Studi lain di Mesir memperkirakan bahwa kebutuhan air untuk gandum akan meningkat sebesar 6,2% dengan penurunan produksi tanaman sebesar 8,6% pada tahun 2050 (Mostafa *et al.*, 2021a).

Karena cuaca ekstrem dan kejadian iklim dalam beberapa tahun terakhir, terdapat keharusan mendesak untuk meminimalkan emisi Gas Rumah Kaca dan meningkatkan keberlanjutan sistem kesehatan (Ebi, 2022). Upaya dunia menghadapi perubahan iklim semakin memotivasi penelitian global untuk menemukan sistem pertanian baru yang mampu menahan tekanan dingin, panas, dan kelembapan.

Analisis risiko perubahan iklim di kawasan Eropa menunjukkan perlunya mengadopsi langkah-langkah untuk mengurangi kerentanan sektor irigasi dan pertanian lainnya terhadap perubahan iklim. Bank Pembangunan Asia (ADB) merekomendasikan strategi adaptasi perubahan iklim seperti meningkatkan efisiensi air dengan menanam tanaman yang bernilai lebih tinggi, membantu petani miskin dengan menyediakan akses terhadap air dan teknologi pertanian modern, dan memberikan perlindungan sosial kepada para petani dari peristiwa yang sangat keras. (ADB, 2020).

Meskipun perubahan iklim mempunyai banyak dampak potensial terhadap keberlanjutan pertanian, adaptasi teknologi dapat mengurangi sebagian dampak tersebut. Padi yang disemai langsung adalah salah satu langkah adaptasi India yang mengurangi dampak perubahan iklim seperti pengurangan penggunaan air, peningkatan hasil panen, dan memberikan keuntungan yang lebih tinggi kepada petani. Strategi adaptasi lainnya untuk mendukung petani dan praktik pertanian mencakup penilaian kesadaran petani terhadap perubahan iklim; penerapan kebijakan iklim publik yang tepat; dan diversifikasi praktik pengelolaan pertanian seperti teknologi baru, benih unggul, akses keuangan, dan pembelajaran profesional (Nkurunziza *et al.*, 2020) (Sohail *et al.*, 2022).

Meskipun sebagian besar peneliti fokus pada prediksi parameter perubahan iklim seperti CO₂ dan suhu di tahun-tahun mendatang, tidak ada kuantifikasi perkiraan dampak perubahan iklim terhadap produksi hasil panen jika semua risiko perubahan iklim terjadi secara bersamaan. Selain itu, saran-saran untuk menangani perubahan iklim kurang memanfaatkan pendekatan sistematis untuk mengelola risiko-risiko perubahan iklim yang teridentifikasi, pada saat risiko-risiko tersebut diperkirakan akan terjadi.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengadopsi Proses Manajemen Risiko sistematis yang dikembangkan oleh PMI 2008 dalam studi perubahan iklim. Melalui penggunaan Proses Manajemen Risiko PMI yang sistematis, tujuan-tujuan berikut akan tercapai.

- Mengusulkan pendekatan sistematis untuk mengelola risiko perubahan iklim.
- Mengidentifikasi risiko perubahan iklim terhadap air irigasi dan hasil panen.
- Mengukur dampak gabungan risiko perubahan iklim terhadap hasil panen; seandainya semua risiko terjadi secara bersamaan.
- Mengusulkan strategi respons untuk meminimalkan dampak buruk perubahan iklim terhadap air irigasi dan hasil panen.

Proses Manajemen Risiko PMI yang sistematis belum diadopsi oleh studi perubahan iklim sebelumnya. Semua penelitian sebelumnya berkonsentrasi pada identifikasi risiko perubahan iklim dan pengembangan strategi mitigasi yang hanya dilakukan satu kali

saja. Motivasi untuk mengadopsi proses Manajemen Risiko PMI yang sistematis dalam penelitian ini adalah untuk mendorong penggunaan proses siklus karena tantangan perubahan iklim berkembang secara dinamis dari waktu ke waktu. Proses manajemen risiko yang dilakukan PMI merupakan sebuah proses bersiklus dengan siklus implementasi yang tidak pernah berakhir, sehingga mengharuskan pembuat kebijakan untuk terus meninjau risiko perubahan iklim dan memperbarui strategi respons mereka. Cara penelitian ini menggunakan Proses Manajemen Risiko siklus PMI (PMI, 2019) untuk menghadapi risiko perubahan iklim merupakan hal yang baru.

Penyebab utama perubahan iklim adalah meningkatnya konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK) di atmosfer yang diakibatkan oleh pesatnya pertumbuhan penduduk dan aktivitas industri. GRK meliputi karbon dioksida (CO₂), nitrogen oksida (N₂O), dan metana (CH₄). Peningkatan emisi CO₂ di atmosfer dapat dikaitkan dengan perluasan pembakaran biomassa dan konsumsi bahan bakar fosil. Diperkirakan CO₂ di atmosfer akan meningkat dari 388 ppm menjadi sekitar 520 ppm pada tahun 2050. Metana (CH₄) memiliki potensi pemanasan global yang setara dengan 72 kali lipat CO₂ (Mostafa *et al.*, 2021b). GRK berdampak buruk pada produksi tanaman. Selama periode 1998 hingga 2011, produksi padi dan jagung mengalami penurunan sebesar 40%, dan emisi CO₂, N₂O, dan CH₄ meningkat sebesar 5%.

Kenaikan suhu sangat dipengaruhi oleh perubahan iklim. Misalnya, suhu di Mesir diperkirakan akan meningkat sebesar 1,4 °C pada tahun 2050 dan 2,5 °C pada tahun 2100. Peningkatan suhu pada musim tanam tanaman akan meningkatkan kebutuhan air tanaman. Permintaan air tanaman diperkirakan meningkat sebesar 10–30% pada tahun 2100, dibandingkan dengan kondisi saat ini. Ada hubungan non-linier antara hasil panen dan suhu, dan gelombang panas mempunyai dampak negatif yang kuat terhadap hasil panen. Hasil panen pada pergantian milenium diperkirakan akan menurun sebesar 31–43% pada skenario pemanasan lambat dan sebesar 67–79% pada skenario pemanasan cepat.

Ketika suhu meningkat, laju penguapan dari bumi dan laut juga akan meningkat. Curah hujan diperkirakan akan meningkat di wilayah lintang tinggi dan tropis, namun menurun di

wilayah semi kering dan lintang tengah kering. Diperkirakan curah hujan akan meningkat masing-masing sebesar 2,1% dan 3,7% pada tahun 2050 dan 2100. Karena curah hujan mempunyai pengaruh yang besar terhadap produksi ikan dan hasil panen, hasil panen tidak selalu sebanding dengan curah hujan, karena melebihi nilai optimal akan menurunkan hasil. Perkiraan peningkatan suhu mungkin memaksa ikan untuk mencoba bermigrasi ke daerah yang lebih dingin; atau pindah ke tempat yang lebih dalam atau ke hulu.

Jika laju curah hujan lebih rendah dari laju penguapan, maka permukaan dan volume air di sungai dan danau akan turun, dan tanah akan menjadi lebih kering. Perubahan ini akan mengakibatkan munculnya hama seperti ganggang biru-hijau, yang menurunkan kadar oksigen terlarut sehingga berdampak negatif pada produksi ikan. Dampak lebih lanjut dari hama ini mencakup: hilangnya hasil panen jagung sebesar 10–12% akibat hama penggerek batang jagung di Afrika, kerugian sebesar 19–30% pada penyimpanan biji-bijian akibat hama penggerek biji-bijian berukuran besar, dan hilangnya 15% pada banyak tanaman akibat hama penggerek batang jagung di Afrika. hama ulat kapas.

Terdapat korelasi yang kuat antara perubahan suhu dan perubahan ozon permukaan (O₃). Perubahan rata-rata O₃ tahunan diperkirakan dapat mencapai 20% karena perubahan iklim jika dibandingkan dengan rekor terkini. Ada bukti kuat, oleh karena itu, polusi O₃ sangat mempengaruhi produktivitas tanaman. Akibat polusi O₃, hasil panen jagung akan menurun sebesar 4,3%, gandum sebesar 10,6%, dan kedelai sebesar 12,1% pada tahun 2030.

Akibat langsung dari perubahan iklim, permukaan air laut diperkirakan akan meningkat. Hal ini akan berdampak buruk pada lahan pertanian rendah melalui banjir dan salinisasi, yang diperkirakan akan menyebabkan penurunan hasil panen sebesar 12–24%. Salinitas muara dan lahan basah pesisir diperkirakan akan meningkat seiring dengan menurunnya aliran sungai dan berkurangnya jumlah sedimen dan nutrisi yang dikirim ke pantai. Salinitas tanah mengurangi hasil panen tanaman sensitif sebesar 14–33%, sedangkan tanaman dengan kadar garam moderat terpengaruh oleh salinitas yang lebih rendah dibandingkan tanaman yang toleran

terhadap garam, sehingga hasil panen berkurang sebesar 4–20% (Amer *et al.*, 2020)

METODE PENELITIAN

Metode penelitian mengikuti Proses Manajemen Risiko formal yang dibahas pada bagian berikutnya.

1. Pertama, daftar risiko perubahan iklim diidentifikasi.
2. Analisis kualitatif dan kuantitatif terhadap risiko yang teridentifikasi dilakukan. Analisis risiko kualitatif mengklasifikasikan risiko relatif terhadap tingkat keparahannya untuk mengidentifikasi pentingnya setiap risiko. Analisis risiko kuantitatif dilakukan terhadap risiko-risiko yang sangat penting untuk mengukur dampak keseluruhannya terhadap air irigasi dan hasil panen.
3. Tanggapan terhadap risiko-risiko yang telah diidentifikasi disarankan untuk membantu pembuat kebijakan mengurangi dampak buruk dari risiko-risiko tersebut.

Manajemen Risiko

Manajemen risiko merupakan aspek penting dalam manajemen untuk mencapai hasil proyek yang mulia dan merupakan salah satu bidang pengetahuan yang diidentifikasi dalam Badan Pengetahuan Manajemen Proyek (PMI 2008). Manajemen risiko adalah proses yang terkenal untuk mengelola proses manufaktur dan proyek konstruksi. Ini adalah proses sistematis untuk merencanakan tindakan yang diperlukan untuk menghadapi kejadian yang tidak pasti, baik ancaman maupun peluang, yang mungkin terjadi pada sistem tertentu. Peristiwa tak pasti (uncertain events) adalah peristiwa di masa depan yang mungkin terjadi atau tidak terjadi, namun jika terjadi, mempunyai dampak yang besar, baik positif atau negatif, terhadap satu atau lebih tujuan sistem. Peristiwa atau kondisi yang tidak menentu ini disebut dengan Risiko (PMI 2008).

Risiko didefinisikan sebagai kombinasi kemungkinan terjadinya suatu peristiwa dan besarnya konsekuensinya (ISO 2018). Tujuan manajemen risiko adalah untuk meningkatkan kemungkinan dan dampak kejadian yang menguntungkan sekaligus mengurangi kemungkinan dan dampak kejadian yang tidak menguntungkan (PMI 2008). Proses Manajemen Risiko mencakup lima tahapan sebagai berikut: (1) Identifikasi Risiko; (2)

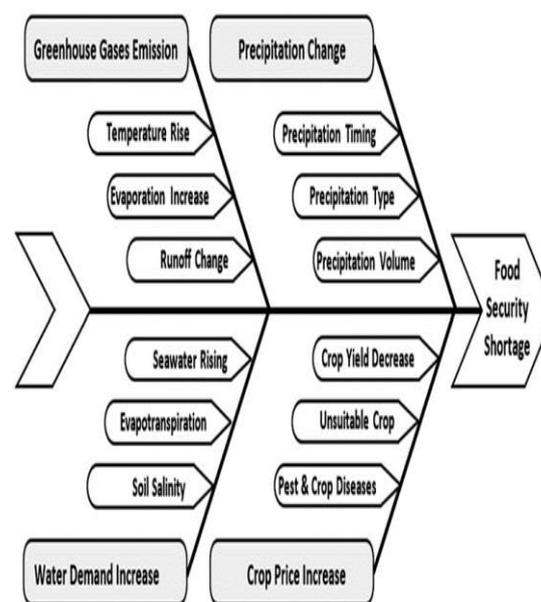
Analisis Risiko Kualitatif; (3) Analisis Risiko Kuantitatif; (4) Respon Risiko; dan (5) Pemantauan dan Pengendalian Risiko.

Identifikasi Risiko

Identifikasi risiko merupakan fase penting untuk menentukan risiko yang mempengaruhi sistem dan men-dokumentasikan karakteristiknya. Teknik seperti Brainstorming, atau Delphi biasanya digunakan untuk mengekstraksi risiko dari panel ahli. Risiko perubahan iklim dikategorikan menjadi: a) risiko ekologi; b) risiko proyek irigasi; c) risiko lingkungan hidup; d) risiko sosial; e) risiko kesehatan; f) risiko keselamatan; dan g) risiko ekonomi.

Dengan bantuan diagram sebab-akibat, hubungan antara penyebab dan dampak risiko perubahan iklim dihubungkan. Salah satu dampak utama perubahan iklim adalah kekurangan pangan, yang mempunyai dua dampak tambahan: penurunan produksi tanaman pangan dan kenaikan harga tanaman pangan. Penyebab perubahan iklim bisa bersifat langsung atau tidak langsung. Penyebab langsung perubahan iklim mencakup perubahan waktu limpasan; perubahan jenis, volume, dan waktu curah hujan; peningkatan penguapan; timbulnya hama dan penyakit tanaman; dan penggunaan pola tanam yang

tidak sesuai. Penyebab tidak langsung dari perubahan iklim adalah emisi gas rumah kaca, yang dapat menyebabkan peningkatan suhu dan peningkatan air laut, yang pada gilirannya menyebabkan peningkatan salinitas tanah dan perubahan evapotranspirasi tanaman, yang pada gilirannya menyebabkan peningkatan kebutuhan air. Gambar 1 menunjukkan diagram sebab-akibat risiko perubahan iklim. Daftar risiko berdasarkan diagram sebab akibat disajikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Diagram Sebab-Akibat Risiko perubahan iklim

Tabel 1. Daftar Risiko Perubahan Iklim yang Teridentifikasi

Kategori Risiko	Kode Risiko	Risiko	Interpretasi
Resiko ekologi	R1	Emisi gas rumah kaca	Karbon dioksida dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, asam nitrat, gas berfluorinasi, sulfur heksafluorida, dan nitrogen trifluorida
	R2	Perubahan volume curah hujan	Perubahan intensitas, kuantitas, dan pemangkasan curah hujan
	R3	Precipitation type	Curah hujan berbentuk cair (gerimis, kabut, dan curah hujan) atau berbentuk beku (salju, hujan es, dan lembaran)
	R4	Jenis curah hujan	Peningkatan pesat suhu rata-rata di seluruh negeri
	R5	Peningkatan Penguapan	Penguapan disebabkan oleh kenaikan suhu atau penurunan tekanan
	R6	Perubahan limpasan	Bagian curah hujan yang muncul di aliran permukaan dan dipengaruhi oleh jumlah dan intensitas curah hujan

	R7	Peningkatan salinitas tanah	Peningkatan ini disebabkan oleh air irigasi yang asin, metode irigasi, atau permukaan air yang tinggi
	R8	Sedimen, ketersediaan nutrisi, dan kelembaban	Lingkungan sistem akar mengontrol nutrisi, ketersediaan air, dan pertumbuhan tanaman
	R9	Risiko kenaikan air laut terhadap erosi tepian pantai	Erosi pantai yang disebabkan oleh pengerukan lepas pantai, pengurangan sedimen sungai, dan degradasi padang lamun, rawa, dan pasir pantai
Risiko proyek irigasi	R10	Peningkatan kebutuhan air irigasi	Peningkatan konsumsi tanaman karena perubahan iklim atau kadar air tanah
	R11	Memilih metode irigasi	Memilih metode irigasi permukaan atau modern yang sesuai dengan jenis tanaman dan tanah
Risiko lingkungan	R12	Risiko kenaikan suhu pada masa pertumbuhan tanaman	Peningkatan suhu, yang meningkatkan kebutuhan air tanaman dan mempengaruhi masa pertumbuhan
	R13	Polusi permukaan ozon	Polusi udara diakibatkan oleh pembakaran batu bara dan bahan bakar lainnya, yang menghasilkan polusi ozon sebagai produk
	R14	Peningkatan CO ₂ berisiko meningkatkan	Peningkatan evapotranspirasi tanaman akibat CO ₂ dan kenaikan suhu
	R15	Risiko kenaikan suhu terhadap evapotranspirasi	Meningkatnya penggunaan tanaman secara konsumtif disebabkan oleh kenaikan suhu
	R16	Memilih pola pemangkasan	Memilih pola tanam yang sesuai dengan iklim, jenis tanah, dan ketersediaan air
Risiko Sosial	R17	Kenaikan permukaan air laut	Meningkatnya permukaan air laut sebagai dampak dari pemanasan global
Risiko Kesehatan	R18	Munculnya hama dan penyakit tanaman	Munculnya hama dan penyakit tanaman yang menurunkan hasil panen rata-rata
	R19	Munculnya penyakit	Munculnya penyakit-penyakit yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia
Risiko Keselamatan	R20	Perubahan aliran sungai	Perubahan aliran sungai karena perubahan curah hujan dan limpasan
	R21	Banjir meningkat	Banjir disebabkan oleh perubahan curah hujan dan limpasan akibat penurunan hasil panen dan kelebihan penduduk
Risiko Ekonomi	R22	Meningkatnya harga pangan	Aksesibilitas terhadap pasokan makanan yang aman dan dapat diterima secara memadai
	R23	Ketahanan pangan	

Analisis Risiko Kualitatif

Setelah mengidentifikasi dan mengkategorikan seluruh risiko perubahan iklim, langkah kedua adalah menganalisis risiko-risiko tersebut secara kualitatif. Selama analisis risiko kualitatif, tingkat keparahan risiko diidentifikasi secara subyektif berdasarkan dua faktor: kemungkinan terjadinya risiko dan dampaknya jika risiko tersebut terjadi. Dalam penelitian ini, teknik Delphi telah digunakan untuk menilai kemungkinan dan dampak risiko perubahan iklim.

Hal ini dilakukan dengan bantuan pendapat dari 8 ahli yang diminta menilai kemungkinan dan dampak setiap risiko perubahan iklim dalam survei online. Skala Likert 5 poin telah digunakan untuk menentukan kemungkinan dan dampak dari setiap risiko. Untuk menilai kemungkinan risiko perubahan iklim, setiap poin pada skala Likert 5 poin dikaitkan dengan nilai numerik; (1), (2), (3), (4), dan (5) masing-masing untuk Jarang, Tidak Mungkin, Mungkin, Mungkin, dan Hampir Pasti. Kemungkinan Rata-Rata Ahli untuk semua perubahan iklim ditunjukkan pada Kolom 2-Tabel 2. Demikian pula, untuk menilai dampak risiko perubahan iklim, setiap poin pada skala Likert 5 poin dikaitkan dengan nilai numerik; (1), (2), (3), (4), dan (5) masing-masing untuk Dampak Tidak Penting, Dampak Kecil, Dampak Sedang, Dampak Besar, dan Dampak Kritis. Kolom 3-Tabel 2 menunjukkan Rata-rata Dampak Para Ahli untuk setiap risiko perubahan iklim. Kolom 4-Tabel 2 memperlihatkan tingkat keparahan setiap risiko, yang dihasilkan dari perkalian rata-rata kemungkinan pakar dengan dampak rata-rata pakar. Kolom 5-Tabel 2 memperlihatkan klasifikasi masing-masing risiko relatif terhadap tingkat keparahannya.

Pengklasifikasian risiko perubahan iklim menjadi 5 zona warna terinspirasi dari konsep yang diperkenalkan oleh PMI (2019), dimana risiko diklasifikasi menjadi 5 zona warna sesuai dengan tingkat keparahannya. Karena skor kemungkinan dan dampak berkisar antara 1 hingga 5, tingkat keparahan (kemungkinan mengalikan dampak) berkisar antara 1 dan 25. Klasifikasi tersebut membagi skala tingkat keparahan menjadi 5 zona yang sama: zona I (Biru) mencakup risiko dengan tingkat keparahan dari 1 hingga 5, zona II (Hijau) mencakup risiko dengan tingkat keparahan 6

hingga 10, zona III (Kuning) mencakup risiko dengan tingkat keparahan 11 hingga 15, zona IV (Oranye) mencakup risiko dengan tingkat keparahan 16 hingga 20, dan zona V (Merah) mencakup risiko dengan tingkat keparahan 21 hingga 25.

Tabel 2. Tingkat Keparahan dan Klasifikasi Risiko yang Teridentifikasi

Kode Risiko	Pakar		Tingkat keparahan	Risiko Zona klasifikasi
	Kemungkinan rata2	Dampak rata2		
1	2	3	4	5
R1	2.52	3.6	9.07	III
R2	2.77	4.32	12	III
R3	1.18	2.9	3.42	II
R4	1.73	4.44	7.68	II
R5	1.88	4	7.5	II
R6	1.02	2.4	2.45	II
R7	2.38	3.1	7.36	III
R8	1.6	2.3	3.68	I
R9	1.67	2.66	4.44	II
R10	2.56	4.56	11.67	III
R11	2.69	4.43	11.9	III
R12	1.08	2.9	3.13	II
R13	1.83	4.88	8.93	II
R14	1	2.9	2.9	I
R15	1	1.63	1.63	I
R16	1.06	2.22	2.35	IV
R17	1.58	3.8	6	IV
R18	1	1.66	1.66	I
R19	1.77	3.59	6.35	IV
R20	1.56	3.89	6.07	IV
R21	1.56	4.1	6.4	IV
R22	1.08	2.79	3	IV
R23	1.94	4.65	9.02	IV

Analisis Risiko Kuantitatif

Fase analisis risiko kuantitatif menganalisis risiko-risiko yang sangat penting seperti yang diidentifikasi selama fase analisis risiko kualitatif. Analisis risiko kuantitatif bertujuan untuk mengukur dampak simultan dari risiko-risiko yang sangat penting menggunakan Simulasi Monte Carlo. Seperti yang direkomendasikan oleh PMI (2019), risiko dengan tingkat keparahan tinggi harus dianalisis lebih lanjut untuk mengukur dampaknya terhadap sistem. Tiga belas risiko di zona II, III, dan IV yang memiliki tingkat keparahan tertinggi dianalisis lebih lanjut menggunakan Simulasi Monte Carlo.

Probabilitas risiko yang ditunjukkan pada Kolom 3-Tabel 3 dihitung dengan membagi Kemungkinan Rata-rata Ahli yang ditunjukkan pada Kolom 2-Tabel 2 dengan 5 yang merupakan kemungkinan maksimum yang mungkin menurut skala yang diberikan selama kuesioner survei. Dampak-dampak yang disajikan pada Kolom 4-Tabel 3 diadopsi dari penelitian-penelitian sebelumnya yang disajikan pada header Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Hasil Tanaman. Nilai yang diharapkan pada Kolom 5-Tabel 3 dihitung

dengan mengalikan probabilitas risiko dan dampak kuantitatifnya (Elnashar dan Elyamany 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Simulasi Monte Carlo

Dampak simultan dari tiga belas risiko kuantitatif perubahan iklim dilakukan menggunakan Simulasi Monte Carlo dengan bantuan @Risk software®. Output simulasinya adalah produksi tanaman, sedangkan input simulasinya adalah dampak risiko perubahan iklim. Dampak kuantitatif dari ketiga belas risiko tersebut dikumpulkan dari literatur sebagai berikut: produksi, sedangkan input simulasinya adalah dampak risiko perubahan iklim. Dampak kuantitatif dari ketigabelas risiko tersebut dikumpulkan dari literatur sebagai berikut:

- Risiko emisi gas rumah kaca (R1) menyebabkan hilangnya hasil panen sebesar 40%.
- Risiko kenaikan suhu (R4) menyebabkan hilangnya hasil panen sebesar 55%.
- Peningkatan risiko salinitas tanah (R7) menyebabkan hilangnya hasil panen sebesar 18%.
- Risiko pencemaran ozon permukaan (R13) menyebabkan hilangnya hasil panen sebesar 9%.
- Risiko munculnya hama dan penyakit (R19) menyebabkan hilangnya hasil panen sebesar 15%.

Delapan resiko lainnya (R2, R5, R10, R11, R17, R20, R21, R23) tidak berdampak langsung terhadap produksi tanaman. Oleh karena itu, dampaknya diabaikan dalam model simulasi.

Persentase kehilangan hasil panen dimasukkan ke dalam perangkat lunak @Risk® sebagai dampak, dimana probabilitas setiap risiko dianggap sebagai kurva probabilitas dengan mean sama dengan Expert Average Likelihood yang disajikan pada Tabel 2. Persentase kehilangan hasil panen (Y) dinyatakan dalam Persamaan. (1).

$$Y = 0,4 * R1 + 0,55 * R4 + 0,18 * R7 + 0,09 * R13 + 0,15 * R19 \quad (1)$$

dimana, Y = persentase kerugian hasil panen, R1,4,7,13,19 = probabilitas risiko.

Perangkat lunak @risk® menjalankan simulasi pada Persamaan. (1) sebanyak 100 kali

(sebagai simulasi selama 100 tahun) untuk memberikan kurva distribusi probabilitas persentase kehilangan hasil panen seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pada gambar ini, persentase kehilangan hasil panen sebesar 90%,

Tingkat kepercayaan 50%, dan 10% masing-masing sama dengan 69%, 57%, dan 45%. Statistik deskriptif kurva distribusi menunjukkan bahwa rata-rata dan deviasi standar persentase kehilangan hasil panen masing-masing sebesar 0,57 dan 0,09. Nilai minimum dan maksimum persentase kehilangan hasil panen masing-masing sebesar 0,34 dan 0,85. Analisis sensitivitas pada Gambar 3 menunjukkan bahwa persentase kehilangan hasil tanaman sangat sensitif terhadap perubahan R4 sebesar 63,6%.

Interpretasi dari hasil-hasil ini menunjukkan bahwa, dalam jangka panjang dan selama 100 tahun, produksi tanaman pangan dapat dikurangi menjadi sekitar setengah dari nilai saat ini. Hal ini menunjukkan perlunya mengadopsi beberapa strategi untuk memitigasi dampak perubahan iklim dan emisi GRK ke atmosfer pada tahun-tahun mendatang.

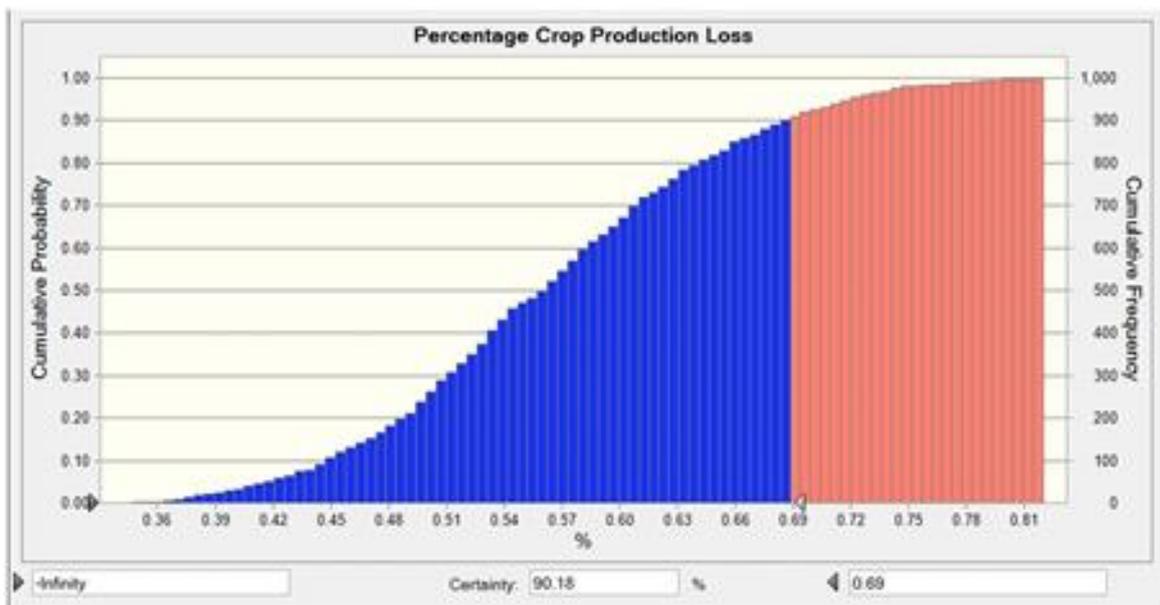
1.1. Fase Respon Risiko

Proses menciptakan pilihan dan memutuskan tindakan untuk meningkatkan peluang dan mengurangi ancaman terhadap sistem ketahanan pangan dikenal sebagai strategi respons risiko. Respons yang tepat terhadap risiko dapat dicapai melalui penerapan strategi untuk mengurangi penyebab utama perubahan iklim, yaitu gas rumah kaca, dan mengembangkan rencana darurat untuk memitigasi dampak buruknya. Empat strategi respons utama terhadap ancaman perubahan iklim adalah:

- (a) Menghindari risiko, yang berarti menghilangkan penyebab risiko.
- (b) Pengalihan risiko, yang berarti mencari pihak ketiga yang siap mengambil tanggung jawab untuk mengelola risiko.
- (c) Memitigasi risiko, yang menurunkan kemungkinan dan/atau dampak risiko ke tingkat yang dapat diterima.
- (d) Menerima risiko, yang dapat diambil ketika tidak mungkin atau tidak praktis untuk merespons risiko dengan tiga strategi lainnya.

Tabel 3. Nilai yang Diharapkan untuk risiko-risiko yang sangat penting

Kode resiko	Zone	Probabilitas (%)	Dampak	Nilai yang Diharapkan
R1	III	50.4	388 – 520 ppm	196 – 262.08 ppm
R2	III	55.4	1.5 – 3.7%	0.83 – 2.05%
R4	II	34.6	1 °C – 2.5 °C	0.346 °C – 0.865 °C
R5	II	37.5	20%	7.50%
R7	III	47.5	-	-
R10	III	51.2	10 – 30%	5.12 – 15.36%
R11	III	53.8	-	-
R13	IV	36.6	20%	7.32%
R17	IV	31.6	3 – 5 mm/year	0.948 – 1.58 mm/year
R19	IV	35.4	-	-
R20	IV	31.2	-	-
R21	IV	31.2	0.5 – 1%	0.156 – 0.312%
R23	IV	38.8	-	-



Gambar 2. Probabilitas Kumulatif Kerugian Produksi Tanaman

Tabel 4 menunjukkan strategi respons yang direkomendasikan untuk masing-masing dari 23 risiko perubahan iklim yang teridentifikasi. Dari keempat strategi respons yang disebutkan di atas, respons yang tepat terhadap masing-masing risiko perubahan iklim ditetapkan dalam penelitian ini hanya berdasarkan rekomendasi yang diberikan oleh penelitian-penelitian sebelumnya. Cara optimal untuk memilih strategi respons terbaik adalah dengan memperhitungkan biaya yang dikeluarkan dengan mengadopsi setiap respons. Hal ini memerlukan analisis biaya yang terperinci mengenai konsekuensi dari setiap

respons risiko pada sistem irigasi, yang diikuti dengan pemilihan strategi respons yang paling hemat biaya. Perbandingan biaya yang terperinci antara respons terhadap masing-masing risiko perubahan iklim berada di luar cakupan penelitian ini, namun hal ini perlu diperhatikan di masa depan. Bagian berikut ini membahas tindakan rinci yang harus diambil oleh pembuat kebijakan untuk mengelola risiko risiko in sebagaimana direkomendasikan oleh penelitian penelitian sebelumnya Tabel 4 Strategi respon risiko untuk risiko yang teridentifikasi.

Tabel 4. Strategi Respon Risiko untuk Risiko yang Teridentifikasi

Kode Risiko	Risiko	Strategi Respons			
		Menghindari	Transfer	Mitigasi	Menerima
R1	Emisi gas rumah kaca			√	
R2	Perubahan volume curah hujan			√	
R3	Jenis curah hujan			√	
R4	Suhu meningkat	√			
R5	Penguapan meningkat			√	
R6	Perubahan limpasan			√	
R7	Salinitas tanah meningkat	√			
R8	Sedimen, ketersediaan nutrisi, dan rezim kelembaban			√	
R9	Risiko kenaikan air laut terhadap erosi tepian pantai			√	
R10	Kebutuhan air irigasi semakin meningkat		√		
R11	Memilih metode irigasi			√	
R12	Risiko kenaikan suhu pada masa pertumbuhan tanaman menurun	√			
R13	Polusi permukaan ozon			√	
R14	Peningkatan CO2 berisiko meningkatkan evapotranspirasi			√	
R15	Risiko kenaikan suhu terhadap evapotranspirasi tanaman semakin meningkat	√			
R16	Memilih pola pemangkasan		√		
R17	Kenakan muka air laut	√			
R18	Munculnya hama dan penyakit tanaman	√			
R19	Munculnya penyakit			√	
R20	Perubahan aliran sungai			√	
R21	Banjir meningkat			√	
R22	Meningkatnya harga pangan			√	
R23	Ketahanan Pangan	√			

1.2. Risiko yang Dihindari

Strategi menghindari risiko melibatkan menghilangkan penyebab risiko. Risiko-risiko berikut ini dapat dihindari dengan menghilangkan penyebabnya.

1.2.1 R15: Risiko Kenaikan Suhu Terhadap Meningkatnya Evapo-transpirasi Tanaman

Risiko ini dapat dihindari melalui adaptasi teknologi, seperti penciptaan kultivar hibrida baru yang memiliki produktivitas lebih tinggi dan ketahanan terhadap kekeringan dan penyakit selama iklim yang buruk.

1.2.2 R4: Kenaikan Suhu

Risiko ini dapat dihindari melalui adaptasi teknologi, seperti mengembangkan pola tanaman baru yang disesuaikan dengan keterbatasan air, suhu tinggi, dan salinitas.

1.2.3 R7: Salinitas Tanah Meningkat dan R17: Kenaikan Muka Air Laut

Kedua risiko ini dapat dihindari dengan:

- (a) menanam tanaman toleran garam dan tanaman energi seperti Jojoba, Jatropha, Miscanthus, dan Poplar yang merupakan alternatif yang cocok di tanah salin (Amer *et al.* 2020).
- (b) memperbaiki sistem drainase yang ada untuk mengendalikan permukaan air.
- (c) pencucian tanah dengan mengidentifikasi jenis garam yang mempengaruhi tanah dan memilih metode reklamasi terbaik (Amer *et al.* 2020).
- (d) mengolah air limbah fasilitas industri dan kesehatan sebelum dibuang ke sungai.

1.2.4 R12: Risiko Kenaikan Suhu pada Masa Pertumbuhan Tanaman Menurun, R18: Muncul Hama dan Penyakit Tanaman, dan R23: Ketahanan Pangan

Ketiga risiko ini dapat dihindari melalui keanekaragaman hayati dan adaptasi pertanian, seperti: (a) Memilih tanaman yang beradaptasi terhadap perubahan lingkungan tanah-iklim

- (b) Mengidentifikasi respon spesies tumbuhan terhadap berbagai kondisi perubahan iklim.
- (c) Mengubah praktik budaya atau waktu penanaman.
- (d) Adaptasi fisik dan ekologi dengan meningkatkan penyimpanan karbon di dalam tanah melalui peningkatan hasil panen.

1.3. Risiko yang Dialihkan

1.3.1 R10: Kebutuhan Air Irigasi Meningkat. Risiko ini dapat ditransfer dengan membina kolaborasi multi-sektor dengan sektor penyediaan air bersih, energi, dan lingkungan

Risiko ini dapat dimitigasi melalui adaptasi keanekaragaman hayati dan pertanian, seperti peningkatan produktivitas dalam hal kuantitas dan kualitas untuk mencegah penyebaran gulma, patogen, serangga, dan hama.

1.4.5 R5: Evaporasi Meningkat, R8: Sedimen, Ketersediaan Unsur Hara, dan Kelembapan Rezim, R11: Pemilihan Metode Irigasi

hidup untuk berbagi risiko dan keuntungan dalam proyek pasokan air.

1.3.2 R16: Memilih Pola Pangkas

Risiko ini dapat ditransfer dengan meningkatkan kemampuan petani dalam menggunakan strategi pengairan yang spesifik pada lokasi tertentu, sistem pendukung pengambilan keputusan, memilih kultivar yang toleran terhadap kekeringan, atau menurunkan input seperti unsur hara atau air untuk mengurangi kekuatan vegetatif, dan metodologi canggih lainnya.

1.4. Risiko yang Dimitigasi

1.4.1 R1: Emisi Gas Rumah Kaca

Risiko ini dapat dimitigasi dengan adaptasi energi sebagai berikut:

- (a) Pemanfaatan bioenergi dengan membudidayakan tanaman bioenergi komersial.
- (b) Meminta perubahan permintaan dari bahan bakar cair ke gas alam.

1.4.2 R14: Peningkatan CO2 Risiko Meningkatnya Evapo-transpirasi Tanaman

Risiko ini dapat dimitigasi dengan adaptasi fisik dan ekologi, seperti melestarikan pohon-pohon hutan yang dapat menghilangkan CO2 dari atmosfer melalui fotosintesis. Konsentrasi CO2 yang lebih tinggi di atmosfer akan meningkatkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan efisiensi air (Betts *et al.* 2007; Gedney *et al.* 2006; Long *et al.* 2006).

1.4.3 R9: Risiko Kenaikan Air Laut Terhadap Erosi Tepian Pantai

Risiko ini dapat dimitigasi dengan adaptasi fisik dan ekologi seperti menjaga dan memulihkan ekosistem serta mengoperasikan kembali waduk.

1.4.4 R19: Hama dan Penyakit yang Muncul

Ketiga risiko ini dapat dimitigasi dengan adaptasi teknologi, seperti.

- (a) Menggunakan sistem irigasi modern untuk menghemat air untuk pertanian.
- (b) Meningkatkan efisiensi irigasi untuk mengurangi kebutuhan air (Hopmans dan Maurer 2008).
- (c) Memperbaiki perencanaan sumber daya air.
- (d) Membangun bendungan pembangkit listrik tenaga air untuk mencapai

- pengendalian kebutuhan irigasi jangka panjang, pasokan air ke wilayah perkotaan, ekosistem, perikanan, dan navigasi.
- (e) Menggunakan PVC pipa plastik untuk saluran saluran.
 - (f) Mengintegrasikan pengelolaan air permukaan dan air tanah untuk mengurangi kerentanan terhadap fluktuasi iklim (Betts *dkk.* 2007).
 - (g) Mengalihkan air ke penggunaan bernilai tinggi (MacAlister dan Subramanyam 2018).
 - (h) Mengembangkan rencana untuk meningkatkan sanitasi dan kualitas air untuk meminimalkan polusi dan daur ulang limbah industri dan limbah.
 - (i) Menyelidiki instalasi desalinasi tenaga angin dan surya untuk mengkompensasi kekurangan air yang diantisipasi.
 - (j) Melaksanakan kampanye kesadaran masyarakat mengenai kelangkaan air.

1.4.6 R2: Perubahan Volume Curah Hujan, R3: Jenis Curah Hujan, R6: Perubahan Limpasan, R21: Banjir Meningkat dan R20: Perubahan Aliran Sungai

Kelima risiko ini dapat dimitigasi dengan adaptasi teknologi, seperti.

- (a) Desain ulang drainase badai, pengendalian banjir, dan pekerjaan tanggul, termasuk ukuran waduk pengendalian banjir.
- (b) Pembangunan bendungan pembangkit listrik tenaga air untuk mencapai pengendalian banjir jangka panjang dan solusi pembangkit listrik tenaga air.
- (c) Memanfaatkan pemanenan air hujan dengan pengumpulan dan penyimpanan air hujan.

1.4.7 R22: Kenaikan Harga Pangan

Risiko ini dapat dimitigasi melalui keanekaragaman hayati dan adaptasi pertanian dengan memilih tanaman yang

1.4.8 R13: Polusi Ozon Permukaan

- (a) Menggunakan produk pendingin dan pendingin ruangan yang tidak mengandung bahan perusak ozon.
- (b) Menggunakan nozel pemulihan uap di pompa bensin,

- (c) Memformulasi ulang bahan bakar bensin yang lebih bersih untuk mengurangi polutan.
- (d) Memberikan batasan ketat terhadap emisi nitrogen oksida dari sumber pembakaran industri dan pembangkit listrik
- (e) Memberikan batasan ketat pada jumlah penggunaan pelarut di pabrik

2. Pemantauan & Pengendalian Risiko

Pemantauan dan pengendalian risiko bertujuan untuk melacak risiko yang teridentifikasi, memantau risiko yang tersisa, menemukan risiko baru, memastikan bahwa rencana risiko telah dilaksanakan dengan benar, dan menilai keberhasilannya dalam meminimalkan risiko. Selain itu, pada fase ini, strategi risiko diterapkan dan dipantau, dan rencana risiko disesuaikan dengan risiko baru. Pemantauan dan pengendalian risiko merupakan proses berkelanjutan sepanjang siklus hidup system.

KESIMPULAN

Melalui simulasi Monte Carlo. Tiga belas risiko di zona II dan III dianalisis dengan analisis risiko kuantitatif. Hasil analisis risiko kuantitatif menunjukkan bahwa kerugian produksi tanaman akibat perubahan iklim diperkirakan sebesar 69%, 57%, dan 45% pada Tingkat kepercayaan masing-masing 90%, 50%, dan 10%. Fase terakhir dari proses manajemen risiko adalah respons risiko. Strategi respons yang direkomendasikan terhadap seluruh risiko yang teridentifikasi dinyatakan dan didiskusikan pada akhir proses. Adalah tugas pengambil keputusan untuk menegakkan penerapan strategi-strategi ini guna memitigasi dampak buruk perubahan iklim terhadap produksi tanaman. Perlu dicatat bahwa pengelolaan risiko yang diusulkan harus menjadi proses tanpa henti untuk mendapatkan manfaat penuh.

DAFTAR PUSTAKA

- ADB. (2020). *Climate change risk and adaptation assessment for irrigation in southern vietnam water eiciency improvement in drought-afected provinces*. Vietnam: ADB.
- Aliyari F, Bailey RT, Arabi M (2021). Appraising climate change impacts on future water resources and agricultural productivity in agro-urban river basins. *Sci Total Environ*, 788(147717).
- Amer M, Wahed O, Abd-Elhamid H, El-Nashar W (2020) Managing risks of water and soil salinity on
- Ebi, K. (2022). Managing climate change risks is imperative for human health. *Nat Rev Nephrol*, 18:74–75.
- Esteve P, Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Downing T (2015) A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecol Econ* 120:49–58
- Liu Z, Herman J, Huang G, Kadir T, Dahlke (2021). Identifying climate change impacts on surface water. *California. Sci Total Environ*, 759(10).
- Mostafa S, Wahed O, El-Nashar W, El-Marsafawy S, Abd-Elhamid H (2021a). Impact of climate change on water resources and crop yield in the Middle Egypt Region. *J Water Supply Res Technol AQUA*, 70(7):1066–1084.
- Mostafa S, Wahed O, El-Nashar W, El-Marsafawy S, Zeleňáková M, Abd-Elhamid H (2021b). Potential climate. *Water*, 13(12).
- Nkurunziza L, Kuyah S, Nyawira S, Ng'ang'a S, Musei S, Chirinda N, Karugu W, Smucker A, Öborn I (2020). Reducing climate risks by improving food production and value chains: a case of sandy soils in Semi-arid Kenya. *Front Clin*, 3(766583).
- Nurzanah, Wiwin & Dewi, Irma. (2024). Bahan Limbah Alami Sebagai Bio-Koagulan Pengolahan Air Limbah Domestik. *Al Ulum*. 12:2-121
- PMI. (2019). *The standard for risk management in portfolios, programs, and projects*. Project Management Institute, Inc.
- Shayanmehr S, Henneberry S, Sabouni M, Foroushani N (2020). Climate change and sustainability of crop yield in dry regions food insecurity. *Sustainability* , 12(23).
- Sohail M, Elkaeed E, Irfan M, Acevedo-Duque A, Mustafa S (2022). Determining Farmers' Awareness About Climate Change Mitigation and Wastewater Irrigation: A Pathway Toward Green and Sustainable Development. *Front Environ Sci* , 10(900193).