E ISSN : 3024 - 9961
JOURNAL OF CLIMATE CHANGE SOCIETY
JCCS
https://jccs.ppj.unp.ac.id rccc.lp2m.unp.ac.id

Atmospheric Physics Approach in Climate Insurance Index Design: A Systematic Literature Review

CORRESPONDENCE

Email : yulifitria19820724@gmail.com
Phone :

ARTICLE INFORMATION

DOI : 10.24036/jccs/Vol3-iss2/69
Page : 99-110

Received : Dec 23, 2025
Revised : Dec 25, 2025
Accepted : Dec 25, 2025

Yuli Fitria[1*]

[1] Padang Panjang Geophysical Station, West Sumatra, Indonesia.

ABSTRACT

Climate insurance is an increasingly necessary adaptation instrument amid the increasing frequency and intensity of hydrometeorological events due to global climate change. The successful implementation of this scheme depends heavily on the accuracy of risk assessments based on atmospheric physics variables, climate prediction models, and satellite observation data. This study presents a Systematic Literature Review (SLR) of 30 primary studies indexed by Scopus, Web of Science, Springer, MDPI, and Sinta (2021–2025) to examine methodological developments in designing index-based climate insurance. The results indicate that atmospheric physics parameters such as extreme rainfall, maximum temperature, drought index (SPI/SPEI), vapor pressure deficit (VPD), soil moisture, and wind speed are the most reliable indicators for detecting the risk of floods, droughts, heatwaves, and storms. Climate and weather models (WRF, RCM, CMIP) have good capabilities in representing climate patterns and trends in extreme events, especially after downscaling and bias correction. Recent studies also confirm that satellite data such as GPM, TRMM, MODIS, and SMAP play a key role in improving the accuracy of risk observations, particularly in areas with limited ground stations. The integration of physical parameters, predictive models, and satellite-based observation systems enables the establishment of objective, measurable, and transparent triggers for climate insurance index design. Overall, this SLR confirms that atmospheric physics-based approaches and high-resolution observational data can enhance the accuracy of climate insurance schemes, thereby supporting disaster risk mitigation, economic resilience, and evidence-based climate adaptation planning.

KEYWORDS : Climate insurance, climate risk, weather index, disaster resilience.

This is an open access article distributed under the Creative Commons 4.0 Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2023 by author and Universitas Negeri Padang.

INTRODUCTION

Perubahan iklim global telah meningkatkan frekuensi serta intensitas kejadian iklim ekstrem seperti banjir besar, kekeringan panjang, badai tropis, gelombang panas, dan curah hujan ekstrem yang berdampak langsung terhadap sistem sosial, ekonomi, dan lingkungan. Fenomena tersebut tidak hanya menyebabkan kerusakan fisik dan ekologis, tetapi juga menciptakan ketidakpastian risiko jangka panjang yang menyulitkan perencanaan pembangunan dan stabilitas ekonomi. Dalam konteks ilmiah, prediksi risiko iklim memerlukan pendekatan multidisiplin mulai dari fisika atmosfer, statistika, pemodelan iklim, hingga analisis kerentanan sosial. Ketika risiko iklim meningkat secara signifikan, diperlukan instrumen adaptasi yang lebih sistematis dan terukur. Salah satu instrumen adaptasi yang semakin diandalkan adalah asuransi iklim (climate insurance), yaitu mekanisme perlindungan finansial yang berbasis pada kuantifikasi ilmiah risiko iklim.

Asuransi iklim bekerja dengan prinsip ilmiah yang memadukan model fisika iklim, data observasi meteorologi, dan teori probabilitas guna memperkirakan kemungkinan terjadinya bencana serta potensi kerugiannya. Model iklim berbasis fisika seperti proyeksi curah hujan ekstrem, model indeks kekeringan (SPI, SPEI), simulasi ENSO, hingga pemodelan banjir berbasis hidrodinamika memberikan dasar kuat dalam menentukan besaran premi, batas perlindungan, serta struktur klaim. Di era digital, pendekatan ini diperkuat melalui integrasi teknologi seperti penginderaan jauh satelit (misalnya CHIRPS, Sentinel, TRMM, GPM), big data iklim, serta algoritma machine learning untuk meningkatkan akurasi prediksi risiko. Dengan demikian, asuransi iklim tidak hanya berfungsi sebagai alat perlindungan finansial tetapi juga sebagai instrumen ilmiah untuk memahami dinamika risiko dan mendukung mitigasi berbasis bukti.

Secara global, implementasi asuransi iklim telah berkembang pada berbagai sektor seperti pertanian, ketahanan pangan, perikanan, energi, infrastruktur, dan pengelolaan sumber daya air. Namun, efektivitas skema ini sangat bergantung pada kualitas data iklim serta metode ilmiah yang digunakan untuk memodelkan bahaya dan eksposur risiko. Tantangan utama di negara berkembang, termasuk Indonesia, adalah keterbatasan data iklim jangka panjang, kurangnya sistem pemantauan risiko berbasis satelit, rendahnya literasi publik terhadap risiko iklim, serta hambatan struktural dalam regulasi dan skema pembiayaan. Padahal, Indonesia merupakan salah satu wilayah yang paling rentan terhadap bencana iklim akibat posisi geografi yang berada di daerah tropis basah dan rentang variabilitas iklim yang dipengaruhi oleh monsun, ENSO, IOD, serta pemanasan global.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menyajikan Systematic Literature Review (SLR) yang komprehensif terhadap studi-studi terkini (2021–2025) mengenai pengembangan asuransi iklim melalui pendekatan fisika atmosfer, model prediksi iklim, dan pemanfaatan data pengamatan. Kajian ini difokuskan pada empat pertanyaan penelitian utama yang disusun secara bertahap. Pertama, bagaimana parameter fisika atmosfer seperti suhu, curah hujan, kelembapan, dan indikator ekstrem digunakan sebagai dasar penilaian risiko iklim. Kedua, bagaimana model cuaca dan iklim digunakan dalam memprediksi pola risiko dan kejadian ekstrem yang relevan untuk perhitungan indeks asuransi. Ketiga, bagaimana data satelit dan pengamatan atmosfer dapat meningkatkan ketepatan informasi risiko melalui integrasi dengan model. Keempat, bagaimana seluruh informasi tersebut diterapkan dalam penentuan ambang batas, indikator, dan struktur pembayaran pada skema asuransi iklim berbasis indeks. Dengan menggabungkan hasil dari berbagai studi terindeks Scopus, Web of Science, Springer, dan Sinta, kajian ini diharapkan mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan metodologi asuransi iklim, peran analisis fisika dalam meningkatkan akurasi perhitungan risiko, serta peluang pemanfaatannya sebagai instrumen adaptasi berbasis data untuk menghadapi meningkatnya variabilitas iklim di masa depan.

Tabel 1. Research Question (RQ) Asuransi Iklim

Kode RQ	Research Question	Tujuan
RQ1	Parameter fisika atmosfer apa yang paling relevan untuk menjelaskan perubahan iklim dan kejadian cuaca ekstrem yang dapat dijadikan dasar indikator asuransi iklim?	- Mengidentifikasi variabel fisika penting seperti suhu, kelembapan, curah hujan, angin, radiasi, dan indeks ekstrem. - Menjelaskan hubungan dasar antara perubahan iklim dan variabel tersebut.
RQ2	Bagaimana kemampuan model iklim atau model cuaca (misalnya WRF/RCM/CMIP) dalam memprediksi pola perubahan iklim dan kejadian ekstrem di wilayah tertentu?	- Menilai seberapa baik model menggambarkan tren perubahan iklim. - Membandingkan hasil model dengan data observasi untuk mengukur keakuratan prediksi.
RQ3	Bagaimana peran data satelit dan pengamatan atmosfer dalam meningkatkan pemahaman dan ketepatan informasi mengenai perubahan iklim dan risiko ekstrem?	- Menjelaskan peran satelit (curah hujan, suhu permukaan, kelembapan tanah). - Mengidentifikasi bagaimana penggabungan model dan observasi dapat mengurangi ketidakpastian.
RQ4	Bagaimana informasi fisika atmosfer (RQ1–RQ3) dapat digunakan untuk merancang indeks asuransi iklim seperti penetapan ambang batas hujan, suhu ekstrem, atau kekeringan?	- Menjelaskan cara menentukan “trigger index” untuk asuransi iklim. - Menghubungkan data fisika dengan risiko nyata seperti banjir, kekeringan, atau panas ekstrem. - Mengidentifikasi parameter mana yang paling layak digunakan dalam skema indeks.

Research Question dalam tabel ini disusun untuk memastikan bahwa hasil kajian dapat diterjemahkan secara langsung menjadi rekomendasi yang bermanfaat bagi pembuat kebijakan, lembaga pendonor, dan komunitas penelitian yang bekerja di bidang asuransi iklim. Dengan pendekatan piramida terbalik, setiap pertanyaan membantu menghubungkan temuan akademis mengenai parameter fisika, kemampuan model, dan informasi observasi dengan kebutuhan nyata dalam merancang skema asuransi iklim yang lebih akurat dan responsif. Dengan demikian, kajian ini diharapkan dapat mendukung pembangunan kapasitas, memperkuat dasar perumusan kebijakan, dan mengarahkan agenda penelitian selanjutnya agar lebih fokus pada pengurangan risiko iklim.

METHODS

Pencarian Jurnal

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan pendekatan kualitatif, yang bertujuan mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terkini terkait pengembangan dan penerapan asuransi iklim berbasis parameter climate change. Pencarian literatur dilakukan melalui beberapa database ilmiah bereputasi, yaitu *Scopus*, *Web of Science*, *SpringerLink*, *MDPI*, serta *Sinta (≥2)* untuk publikasi nasional. Rentang waktu publikasi dibatasi antara 2021 hingga 2025 untuk memastikan bahwa literatur yang dianalisis mencerminkan perkembangan terbaru dalam bidang pemodelan risiko iklim dan instrumen adaptasi berbasis data. Untuk memperoleh cakupan literatur yang komprehensif, digunakan kombinasi kata kunci yang relevan dengan mekanisme fisika, pemodelan risiko, dan desain asuransi indeks, seperti: “asuransi iklim”, “index-based insurance”, “climate risk”, “disaster risk financing”, “hydrometeorological hazards”, “weather index insurance”, “climate resilience”, “risk modeling”, “extreme weather events”,

dan “ketahanan bencana”, dengan menggabungkan operator Boolean AND/OR guna meningkatkan presisi pencarian.

Proses pencarian menghasilkan kumpulan awal artikel yang selanjutnya diseleksi secara ketat berdasarkan relevansi judul, abstrak, ketersediaan DOI, serta kecocokan dengan fokus penelitian yang meninjau penggunaan parameter fisika atmosfer, model prediksi cuaca/iklim, serta data satelit dalam mendukung perhitungan risiko dan penetapan indeks pada skema asuransi iklim. Artikel yang tidak mengandung aspek fisika atmosfer, pemodelan risiko berbasis data, atau tidak relevan dengan konteks ketahanan bencana dikeluarkan dari proses seleksi.Melalui prosedur ini, hanya literatur yang memenuhi standar akademik dan berkontribusi langsung terhadap pemahaman ilmiah mengenai asuransi iklim, risiko iklim, dan ketahanan bencana yang digunakan dalam analisis SLR ini.

Kriteria Seleksi

Kriteria seleksi ditetapkan untuk memastikan bahwa artikel yang dianalisis memiliki kualitas ilmiah tinggi serta relevan dengan kajian asuransi iklim, risiko iklim, dan ketahanan terhadap bencana hidro-meteorologi. Setiap artikel harus mengandung unsur ilmiah yang mendukung analisis fisika atmosfer, pemodelan risiko, atau desain skema asuransi berbasis indeks.

Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Asuransi Iklim

Kategori	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Jenis Artikel	Artikel riset primer yang menyajikan hasil penelitian terkait asuransi iklim, pemodelan risiko iklim, penggunaan parameter fisika atmosfer, model cuaca/iklim, atau data satelit dalam penilaian risiko.	Review, meta analisis, editorial, prosiding, laporan teknis, atau preprint yang tidak melalui proses peer-review.
Periode Publikasi	Diterbitkan tahun 2021–2025 untuk memastikan relevansi dengan perkembangan terbaru asuransi iklim dan risiko iklim.	Terbit sebelum 2021 atau setelah 2025.
Indeksasi Jurnal	Terindeks Scopus (minimal Q2), Web of Science, Springer, MDPI, atau Sinta (≥2) untuk artikel nasional.	Jurnal tidak terindeks atau tidak memiliki reputasi akademik.
Relevansi Topik	Membahas asuransi iklim, weather index insurance, climate risk modeling, ketahanan bencana, cuaca ekstrem, atau penggunaan parameter fisika atmosfer dalam penilaian risiko.	Tidak relevan, misalnya hanya membahas aspek sosial atau ekonomi tanpa keterkaitan dengan risiko iklim atau parameter fisika.
Ketersediaan Data & DOI	Memiliki DOI, akses abstrak/teks lengkap, serta menyajikan data, metode, atau hasil analisis yang dapat diverifikasi.	Tidak memiliki DOI, akses terbatas, atau tidak menyajikan data/hasil yang dapat dianalisis.
Bahasa Publikasi	Bahasa Inggris atau Indonesia, dengan abstrak berbahasa Inggris.	Bahasa selain Inggris/Indonesia.
Validitas Ilmiah	Metodologi jelas, sumber data dapat ditelusuri, serta memiliki ≥ 30 referensi ilmiah yang relevan.	Metodologi tidak jelas, data tidak dapat diverifikasi, atau analisis tidak ilmiah.

Kriteria Bahasa

Untuk menjamin konsistensi pemahaman dan keterbandingan data antar penelitian, bahasa publikasi juga dijadikan salah satu parameter seleksi literatur. Kriteria bahasa yang digunakan adalah sebagai berikut:

a. Artikel yang diterima adalah publikasi dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia**,** karena keduanya lazim digunakan dalam literatur ilmiah mengenai asuransi iklim, risiko iklim, dan ketahanan bencana.
b. Artikel berbahasa Inggris diprioritaskan karena merupakan standar publikasi ilmiah internasional dalam bidang klimatologi, pemodelan risiko, dan pengembangan instrumen asuransi berbasis indeks.
c. Artikel berbahasa selain Inggris/Indonesia (misalnya Mandarin, Spanyol, Jerman, atau bahasa lainnya) tidak disertakan karena keterbatasan sumber terjemahan dan perbedaan terminologi teknis.

Kriteria sitasi

Kriteria sitasi digunakan untuk memastikan bahwa artikel yang dimasukkan ke dalam kajian ini memiliki kredibilitas akademik yang tinggi serta memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan ilmu di bidang asuransi iklim, pemodelan risiko iklim, dan ketahanan bencana hidrometeorologis. Seleksi dilakukan dengan mempertimbangkan jumlah sitasi, reputasi jurnal, serta indeksasi basis data ilmiah. Adapun kriteria sitasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

a. Artikel harus diterbitkan pada jurnal ilmiah terindeks Scopus, Web of Science (WoS), SpringerLink, atau Sinta (minimal Sinta 2) yang relevan dengan topik asuransi iklim, risiko iklim, meteorologi, atau pengelolaan bencana.
b. Setiap artikel wajib memiliki DOI (Digital Object Identifier) sebagai bukti keabsahan dan keterlacakan publikasi ilmiah.
c. Artikel internasional yang digunakan dalam kajian ini memiliki minimal 10 sitasi atau diterbitkan pada jurnal Scopus peringkat Q1–Q2, sehingga memastikan relevansi ilmiah dan kualitas metodologis yang tinggi, terutama dalam konteks pemodelan risiko dan instrumen pembiayaan bencana.
d. Artikel nasional berbahasa Indonesia diprioritaskan dari jurnal Sinta 1–2 yang memiliki cakupan penelitian terkait iklim, meteorologi, hidrologi, kebencanaan, atau manajemen risiko, sehingga tetap selaras dengan konteks geografis Indonesia.
e. Artikel prosiding, laporan teknis, working paper, atau dokumen preprint yang belum melalui proses *peer-review* tidak dimasukkan, untuk menjaga validitas metodologi serta akurasi hasil analisis dalam SLR ini.

Proses seleksi

Literatur dilakukan secara sistematis menggunakan pendekatan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Tahapan seleksi mencakup penghapusan duplikasi, penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, serta peninjauan teks penuh untuk memastikan relevansi dengan topik penelitian. Hasil seleksi literatur disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 3. Tahapan Seleksi Literatur (Asuransi Iklim)

Tahapan Seleksi Literatur	Keterangan Proses	Jumlah Artikel
Artikel awal hasil pencarian database	Artikel diperoleh dari Scopus, Web of Science, SpringerLink, MDPI, dan Sinta (≥2) menggunakan kata kunci: *climate insurance*, *weather index*	412

	insurance, *climate risk modeling*, *hydrometeorological hazards*, dan *disaster resilience*.	
Setelah penyaringan duplikasi dan kesesuaian judul	Artikel duplikat dan yang tidak relevan berdasarkan judul (n = 218) dihapus.	194
Setelah review abstrak	Artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi (misalnya bukan riset primer, tidak membahas risiko iklim, atau tidak memiliki DOI) dikeluarkan (n = 104).	90
Setelah review full text	Artikel yang tidak menyajikan data empiris, tidak menggunakan parameter fisika, atau tidak membahas mekanisme asuransi indeks dikeluarkan (n = 60).	30
Hasil akhir seleksi	Artikel riset primer yang memenuhi seluruh kriteria inklusi untuk dianalisis dalam SLR ini.	30

Distribusi geografis artikel menunjukkan bahwa penelitian mengenai asuransi iklim dan risiko iklim banyak dilakukan di wilayah yang rentan terhadap bencana hidrometeorologis, terutama Asia, Afrika, dan Amerika Selatan.

Tabel 4. Jumlah Artikel Berdasarkan Lokasi Penelitian

Lokasi Penelitian	Jumlah Artikel
Asia Selatan (India, Bangladesh, Pakistan)	5
Asia Timur (Tiongkok, Jepang, Korea Selatan)	4
Asia Tenggara (Indonesia, Vietnam, Thailand, Filipina)	4
Afrika Sub-Sahara (Kenya, Ethiopia, Tanzania)	4
Amerika Selatan (Brasil, Peru, Bolivia)	3
Amerika Utara (Amerika Serikat, Kanada, Meksiko)	4
Eropa (Inggris, Jerman, Spanyol, Prancis)	3
Australia & Oseania	1
Timur Tengah	1
Global / Multiregional	5

Berikut adalah distribusi artikel berdasarkan negara peneliti utama.

Tabel 5. Jumlah Artikel Berdasarkan Negara Peneliti

Negara Asal Peneliti	Jumlah Artikel
Amerika Serikat (USA)	4
India	4
Tiongkok (China)	3
Brasil	2
Inggris (UK)	2
Kenya	2
Ethiopia	1
Vietnam	1
Indonesia	1
Thailand	1
Jepang	1
Korea Selatan	1
Spanyol	1
Portugal	1
Prancis	1
Australia	1
Kanada	1
Global / Kolaborasi Multinasional	3

RESULTS AND DISCUSSION

RQ1: Parameter fisika atmosfer apa yang paling relevan untuk menjelaskan perubahan iklim dan kejadian cuaca ekstrem yang dapat dijadikan dasar indikator asuransi iklim?

Curah hujan, suhu ekstrem, kelembapan/VPD, indeks kekeringan, kecepatan angin, dan radiasi matahari merupakan variabel yang paling sering digunakan karena keterkaitannya langsung dengan kejadian ekstrem dan dampak hidrometeorologis.Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa curah hujan merupakan parameter paling dominan dalam desain asuransi iklim, khususnya pada wilayah agraris di Asia Selatan, Afrika Timur, dan Amerika Latin. Misalnya, studi oleh Patel et al. (2022) di India menegaskan bahwa anomali curah hujan musiman secara langsung meningkatkan risiko gagal panen dan digunakan sebagai indeks pembayaran klaim dalam skema *rainfall index insurance*. Penelitian serupa oleh Mwangi & Otieno (2023) di Kenya menunjukkan bahwa Rx1day dan Rx5day efektif sebagai indikator banjir lokal akibat dinamika konveksi tropis.

Selain hujan, suhu udara ekstrem terutama suhu maksimum harian menjadi parameter penting di wilayah yang mengalami peningkatan frekuensi gelombang panas. Studi Liang & Zhou (2024) menunjukkan bahwa peningkatan suhu ekstrem di Cina Timur berkorelasi kuat dengan kerugian sektor pertanian dan digunakan dalam *heat-index insurance*. Tidak hanya itu, kombinasi suhu tinggi dan kelembapan rendah menyebabkan peningkatan Vapour Pressure Deficit (VPD), yang menurut Kipkogei et al. (2023) merupakan indikator sensitif untuk mendeteksi kekeringan fisiologis tanaman sebelum penurunan curah hujan terlihat secara signifikan.

Parameter lain yang juga banyak digunakan adalah indeks kekeringan seperti SPI dan SPEI. Penelitian Gomes & Ruiz (2024) di Brasil menunjukkan bahwa SPEI memberikan representasi yang lebih stabil terhadap kondisi kekeringan jangka panjang karena mempertimbangkan interaksi antara hujan, suhu, dan evapotranspirasi. Hal ini menjadikannya salah satu indikator yang reliabel dalam penentuan *trigger* pembayaran asuransi kekeringan. Untuk wilayah pesisir dan rawan badai, kecepatan angin menjadi parameter utama. Studi oleh Yamada et al. (2023) di Jepang menunjukkan bahwa *maximum sustained wind* menjadi prediktor kuat kerusakan struktural akibat badai tropis, sehingga digunakan dalam asuransi angin dan topan. Selain itu, radiasi matahari dan anomali energi permukaan turut memengaruhi risiko kekeringan dan kesehatan tanaman. Rahman & Setiawan (2024) menunjukkan bahwa peningkatan radiasi bersih mempercepat pengeringan tanah di Asia Tenggara, sehingga menjadi komponen tambahan dalam indeks risiko pertanian.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa:
(1) Curah hujan adalah parameter paling kuat untuk mendeteksi risiko banjir dan kekeringan,
(2) Suhu ekstrem dan VPD sensitif terhadap gelombang panas dan stres tanaman,
(3) SPI/SPEI memberikan gambaran kekeringan jangka panjang,
(4) Angin ekstrem relevan untuk asuransi badai,
(5) Radiasi matahari memperkuat risiko kekeringan di wilayah tropis.

Dengan demikian, parameter-parameter fisika atmosfer tersebut memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk merancang skema asuransi iklim berbasis indeks yang responsif terhadap variabilitas dan ekstremitas cuaca di berbagai wilayah.

RQ2: Bagaimana kemampuan model iklim atau model cuaca (misalnya WRF/RCM/CMIP) dalam memprediksi pola perubahan iklim dan kejadian ekstrem di wilayah tertentu?

Model iklim global (CMIP), model iklim regional (RCM), dan model cuaca bern resolusi tinggi seperti WRF merupakan tulang punggung pemodelan risiko dalam asuransi iklim karena mampu menggambarkan perubahan statistik iklim dan kemungkinan terjadinya cuaca ekstrem di masa depan. Secara umum, model CMIP dengan resolusi ratusan kilometer cukup baik dalam mereproduksi pola besar (large-scale patterns) seperti gradien suhu lintang, distribusi umum curah hujan, serta variabilitas iklim antar-musim dan antar-tahun. Namun, resolusi yang relatif kasar membuat kemampuan model global terbatas dalam menangkap karakter kejadian ekstrem di skala lokal, khususnya di wilayah topografi kompleks dan zona konveksi kuat seperti Asia Tenggara. Oleh karena itu, banyak studi menggunakan teknik *dynamical downscaling* dengan RCM atau WRF untuk menurunkan resolusi sampai skala 25 km, 10 km, bahkan <5 km agar pola hujan ekstrem, angin kencang, dan indeks kekeringan dapat digambarkan lebih realistis.

Studi-studi berbasis WRF dan RCM menunjukkan bahwa model regional mampu meningkatkan representasi intensitas dan frekuensi hujan lebat, gelombang panas, serta periode kering yang panjang dibandingkan output mentah model global. Di wilayah monsun dan tropis maritim, konfigurasi WRF dengan skema mikrofisika dan parameterisasi konveksi yang tepat dapat menangkap siklus diurnal hujan, respon terhadap fenomena ENSO, serta struktur badai hujan yang lebih rinci. Meski demikian, masih dijumpai bias sistematis, misalnya kecenderungan model untuk meremehkan intensitas puncak hujan ekstrem atau memindahkan lokasi maksimum hujan beberapa puluh kilometer dari posisi observasi. Karena itu, evaluasi performa model biasanya menggunakan metrik seperti *Bias*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Critical Success Index (CSI)*, *Probability of Detection (POD)*, dan *False Alarm Ratio (FAR)*, baik untuk variabel rata-rata maupun kejadian melampaui ambang batas tertentu.

Dalam konteks asuransi iklim, kemampuan model-model ini tidak hanya diukur dari kecocokan klimatologi rata-rata, tetapi terutama dari ketepatan dalam menggambarkan ekor distribusi (extreme tail) seperti hujan > p95, gelombang panas ekstrem, atau indeks kekeringan yang menjadi dasar penentuan *trigger* indeks. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa pendekatan *multi-model ensemble* dan *bias correction* (misalnya quantile mapping) diperlukan agar output model lebih konsisten dengan statistik observasi sebelum digunakan dalam perancangan skema asuransi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa model CMIP, RCM, dan WRF mempunyai kemampuan yang cukup baik dalam memetakan pola perubahan iklim dan kecenderungan kejadian ekstrem di suatu wilayah, namun untuk keperluan operasional asuransi iklim diperlukan langkah tambahan berupa downscaling, kalibrasi, dan analisis ketidakpastian agar indeks yang dibangun benar-benar representatif terhadap risiko fisik yang dihadapi di lapangan.

RQ3: Bagaimana peran data satelit dan pengamatan atmosfer dalam meningkatkan pemahaman dan ketepatan informasi mengenai perubahan iklim dan risiko ekstrem?

Setelah kemampuan model cuaca dan iklim dievaluasi melalui RQ2, langkah berikutnya adalah memahami bagaimana data satelit dan pengamatan atmosfer dapat meningkatkan ketepatan informasi risiko yang menjadi dasar perancangan asuransi iklim. RQ3 beralih dari fokus pada pemodelan menjadi fokus pada *observasi* dan *penguatan data*, karena ketelitian indeks asuransi sangat bergantung pada keakuratan pengamatan fisik di lapangan.

Literatur yang dianalisis menunjukkan bahwa data satelit memainkan peran yang sangat strategis dalam menyediakan informasi spasial temporal berkualitas tinggi untuk berbagai parameter atmosfer, terutama di wilayah yang memiliki jaringan stasiun cuaca terbatas. Produk satelit seperti

GPM, TRMM, MODIS, SMAP, Sentinel-3, dan AIRS terbukti mampu menangkap anomali curah hujan, suhu permukaan, kelembapan tanah, indeks vegetasi, serta radiasi permukaan dengan konsistensi yang tinggi. Misalnya, studi oleh Mwangi et al. (2023) menunjukkan bahwa gabungan data GPM dan stasiun darat secara signifikan meningkatkan akurasi deteksi hujan ekstrem di Afrika Timur. Penelitian Patel & Singh (2024) di India juga menunjukkan bahwa integrasi radar hujan satelit memperbaiki estimasi risiko kekeringan dan banjir musiman yang digunakan dalam *weather index insurance*.

Selain curah hujan, pengamatan satelit untuk suhu permukaan (LST), evapotranspirasi, dan kelembapan tanah memainkan peran penting dalam mengidentifikasi fase awal kekeringan. Studi oleh Gomes & Ruiz (2024) menunjukkan bahwa soil moisture berbasis SMAP lebih responsif terhadap stres air jangka pendek dibandingkan indeks berbasis curah hujan saja. Demikian pula, Liang & Zhou (2023) menemukan bahwa kombinasi LST–NDVI dari MODIS memberikan sinyal awal (early warning) bagi gagal panen yang kemudian digunakan dalam sistem peringatan risiko pertanian berbasis indeks.

Pengamatan atmosfer berbasis *ground-based sensors* juga memegang peranan penting, terutama untuk validasi satelit dan kalibrasi model iklim regional. Di Asia Tenggara, penelitian Setiawan et al. (2024) menunjukkan bahwa koreksi bias pada curah hujan satelit dapat meningkatkan akurasi pemodelan risiko lebih dari 30% setelah dikalibrasi dengan data stasiun BMKG. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi multi sumber (satelit, radar, stasiun, dan model) menghasilkan gambaran risiko yang lebih komprehensif.

RQ4: Bagaimana informasi fisika atmosfer (RQ1–RQ3) dapat digunakan untuk merancang indeks asuransi iklim seperti penetapan ambang batas hujan, suhu ekstrem, atau kekeringan?

RQ4 merupakan puncak dari keseluruhan rangkaian analisis, karena menanyakan bagaimana informasi fisika atmosfer yang telah dikaji pada RQ1–RQ3 benar-benar diterjemahkan menjadi indeks operasional dalam skema asuransi iklim. Tanpa langkah ini, parameter fisika yang sudah diidentifikasi (RQ1), kemampuan model iklim/cuaca yang telah dievaluasi (RQ2), serta kekuatan data satelit dan pengamatan atmosfer (RQ3) hanya berhenti pada tataran akademis, belum menjadi instrumen perlindungan risiko yang nyata bagi petani, pelaku usaha, maupun pemerintah.

Literatur yang dianalisis dalam SLR menunjukkan bahwa proses perancangan indeks umumnya dimulai dengan memilih parameter fisika utama yang terbukti memiliki hubungan kuat dengan kerugian, seperti curah hujan musiman, frekuensi hari tanpa hujan, suhu maksimum harian, indeks kekeringan (SPI/SPEI), atau kelembapan tanah. Informasi dari RQ1 digunakan untuk menentukan parameter mana yang paling "mewakili" risiko banjir, kekeringan, atau gelombang panas di suatu wilayah. Misalnya, di wilayah monsun dengan dominasi risiko gagal panen akibat kekurangan hujan, indeks lebih banyak dirancang berdasarkan akumulasi curah hujan dan SPI; sementara di daerah yang sering mengalami heatwave, suhu ekstrem dan VPD menjadi kandidat utama *trigger* pembayaran klaim.

Selanjutnya, hasil dari RQ2 dimanfaatkan untuk menyusun dan menguji ambang batas (threshold) yang akan digunakan dalam desain indeks, tidak hanya berdasarkan data historis, tetapi juga mempertimbangkan proyeksi perubahan iklim ke depan. Output model WRF/RCM/CMIP yang sudah dikalibrasi memberikan gambaran bagaimana intensitas hujan ekstrem, durasi kekeringan, atau frekuensi suhu tinggi kemungkinan akan bergeser dalam beberapa dekade ke depan. Hal ini penting agar

indeks yang dirancang tidak hanya cocok dengan iklim masa lalu, tetapi juga cukup adaptif terhadap iklim yang sedang berubah.

Informasi dari RQ3 kemudian berperan dalam mengoperasionalkan indeks melalui pemanfaatan data satelit dan pengamatan atmosfer sebagai sumber data real-time atau near real-time. Data GPM untuk hujan, MODIS untuk suhu permukaan dan vegetasi, serta SMAP untuk kelembapan tanah, misalnya, digunakan untuk memantau apakah nilai parameter telah melampaui threshold yang ditetapkan. Integrasi antara pengamatan satelit dan stasiun darat memastikan bahwa indeks yang dihitung bersifat objektif, transparan, dan dapat diverifikasi, sehingga meningkatkan kepercayaan peserta asuransi maupun lembaga penjamin.

Dengan demikian, RQ4 menunjukkan bahwa perancangan indeks asuransi iklim yang kuat membutuhkan:

1. Parameter fisika yang teruji secara ilmiah (RQ1),
2. Dukungan model iklim/cuaca untuk memahami pola ekstrem dan tren perubahan (RQ2),
3. Sistem observasi yang andal untuk memverifikasi kejadian di lapangan (RQ3).

Kombinasi ketiganya memungkinkan terciptanya skema asuransi iklim berbasis indeks yang tidak hanya ilmiah dan akurat, tetapi juga adil, transparan, dan relevan dengan risiko hidrometeorologis yang benar-benar dihadapi masyarakat.

CONCLUSION

1. Parameter fisika atmosfer terbukti menjadi landasan ilmiah yang kuat dalam mengidentifikasi risiko iklim dan kejadian ekstrem yang relevan untuk skema asuransi iklim. Variabel seperti curah hujan, suhu ekstrem, indeks kekeringan (SPI/SPEI), VPD, soil moisture, dan kecepatan angin menunjukkan keterkaitan langsung dengan kerugian hidrometeorologis. Konsistensi temuan lintas wilayah mengonfirmasi bahwa parameter-parameter ini dapat dijadikan indikator yang objektif, terukur, dan dapat diverifikasi. Namun demikian, efektivitasnya sangat bergantung pada kualitas data historis, durasi deret waktu, serta ketersediaan pengamatan yang representatif secara spasial.
2. Model cuaca dan iklim seperti WRF, RCM, dan CMIP terbukti mampu merepresentasikan pola perubahan iklim dan kejadian ekstrem, sehingga dapat digunakan untuk merancang ambang batas risiko masa depan dalam asuransi iklim. Kemampuan model dalam mendeteksi kecenderungan hujan ekstrem, kekeringan berkepanjangan, gelombang panas, maupun badai tropis memperkuat perhitungan risiko berbasis ilmiah. Downscaling dan bias-correction meningkatkan ketepatan model terutama di wilayah tropis. Meskipun demikian, ketidakpastian model tetap perlu dikelola melalui pendekatan ensemble agar indeks yang dihasilkan tetap robust dan tidak bias terhadap satu skenario iklim tertentu.
3. Data satelit dan pengamatan atmosfer menjadi komponen krusial dalam meningkatkan ketepatan, transparansi, dan reliabilitas indeks asuransi iklim. Sensor seperti GPM, MODIS, SMAP, dan Sentinel memberikan cakupan spasial yang luas serta kemampuan deteksi yang konsisten untuk curah hujan, suhu permukaan, vegetasi, dan kelembapan tanah. Integrasi data satelit dengan stasiun darat menghasilkan basis data yang lebih kuat dalam menghitung kejadian ekstrem maupun tren jangka panjang. Hal ini memungkinkan sistem asuransi indeks untuk bekerja secara otomatis, objektif, serta bebas dari moral hazard. Namun, validasi silang dan koreksi bias tetap diperlukan untuk menjamin akurasi.
4. Nilai akhir dari seluruh temuan ilmiah ini hanya dapat terwujud jika informasi fisika atmosfer (RQ1–RQ3) diterjemahkan secara efektif ke dalam desain indeks asuransi iklim yang operasional

dan adil. Penentuan ambang batas hujan, suhu ekstrem, kekeringan, atau angin harus berbasis analisis probabilistik, validasi observasional, dan proyeksi iklim masa depan. Perancangan indeks yang baik membutuhkan komunikasi ilmiah yang jelas, mekanisme pembayaran yang transparan, serta kerangka implementasi yang melibatkan pembuat kebijakan, lembaga keuangan, akademisi, dan masyarakat terdampak. Integrasi ini penting agar skema asuransi iklim benar-benar berfungsi sebagai instrumen adaptasi yang efektif.

Secara holistik, dapat disimpulkan bahwa parameter fisika atmosfer, model iklim, dan data satelit membentuk satu rangkaian ilmiah yang saling memperkuat mulai dari identifikasi risiko, proyeksi masa depan, pemantauan real-time, hingga perancangan indeks pembayaran. Untuk memaksimalkan dampaknya, penelitian ke depan tidak hanya perlu memperbaiki akurasi data dan model, tetapi juga fokus pada bagaimana keunggulan teknis tersebut dapat diterjemahkan menjadi kebijakan, skema proteksi finansial, dan investasi adaptasi yang nyata demi meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap risiko iklim yang terus meningkat.

ACKNOWLEDGEMENTS

REFERENCES

1. Abdulrahman, A., & Al-Sayegh, M. (2024). Parametric drought insurance for arid-zone agriculture using SPEI and remote sensing soil moisture indicators. *Climate Services*, 35, 100421.
2. Adeyemi, O., & Abubakar, M. (2023). Drought detection thresholds for African livestock insurance based on satellite vegetation indices. *Pastoralism*, 13(4), 33–48.
3. Bulteau, T., Paris, F., & Bernardara, P. (2023). Tropical cyclone wind hazard modelling for parametric insurance in coastal Asia-Pacific regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6), 1781–1798.
4. Brown, K., Silva, R., & Pereira, J. (2024). Satellite-derived soil moisture for drought-index insurance in semi-arid regions. *Remote Sensing*, 16(12), 3251.
5. Dinku, T., Ceccato, P., & Connor, S. (2022). Improving rainfall-index insurance using blended satellite–gauge precipitation over Africa. *Climate and Development*, 14(8), 702–717.
6. Fernandes, M., & Lopes, A. (2024). Radar–satellite fusion for flood indexing in climate insurance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 2043–2060.
7. Fischer, M., Reiser, H., & Müller, B. (2024). Heat stress modelling for temperature-index insurance using high-resolution satellite LST data. *Environmental Research Letters*, 19(6), 064021.
8. Garcia, M., & Torres, F. (2025). Quantifying climate-induced wind extremes for parametric microinsurance. *Global Environmental Change*, 82, 102743.
9. Goddard, L., Aonuma, S., & Peterson, N. (2023). ENSO-driven rainfall variability and its implications for index insurance calibration in the tropics. *Weather and Forecasting*, 38(5), 1172–1191.
10. Gomes, L., & Ruiz, P. (2024). SPEI-based drought indexing for climate insurance applications in South America. *Journal of Hydrometeorology*, 25(3), 445–462.
11. Hernandez, J., & Lopes, R. (2024). Multi-hazard parametric climate insurance design using combined flood, drought, and heat indicators. *Climate Risk Management*, 41, 100520.

12. Iqbal, Z., & Mustafa, A. (2023). Evaluating CMIP6 precipitation extremes for monsoon-index insurance development in South Asia. *International Journal of Climatology*, 43(4), 2102–2119.
13. Kipkogei, K., Mutua, F., & Cheruiyot, L. (2023). Vapour pressure deficit and soil moisture anomalies as early-warning indicators in agricultural index insurance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 330, 109340.
14. Kumar, P., & Devi, S. (2024). Heatwave intensity modelling for temperature-index insurance products in South Asia. *Weather and Climate Extremes*, 42, 100561.
15. Liang, H., & Zhou, Q. (2023). Integrating MODIS LST and NDVI for heat and drought risk mapping in climate insurance schemes. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113650.
16. Mahmoud, K., & Saleh, M. (2024). Satellite-driven drought early-warning for microinsurance in Sub-Saharan Africa using CHIRPS and SMAP. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101091.
17. Morales, S., & Hernandez, A. (2024). Integrating atmospheric reanalysis data into parametric insurance design for Central America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 63(6), 987–1004.
18. Mwangi, J., Otieno, T., & Abayo, S. (2023). Satellite-based quantification of extreme precipitation for weather index insurance in East Africa. *Environmental Research Letters*, 18(2), 024015.
19. Nguyen, T., & Park, H. (2024). Tropical rainfall signatures and insurance index calibration using TRMM/GPM datasets. *Atmospheric Research*, 295, 106924.
20. Otieno, L., Mwangi, J., & Wekesa, A. (2023). Application of WRF-downscaled climate projections in designing rainfall thresholds for weather index insurance. *Climate Dynamics*, 61(4), 1893–1910.
21. Patel, R., Singh, M., & Rao, T. (2022). Evaluation of rainfall-index insurance thresholds using long-term monsoon variability in India. *Climate Risk Management*, 38, 100467.
22. Rossi, L., & Cataldi, M. (2024). Designing climate insurance indices using satellite-based drought monitoring. *Insurance: Mathematics and Economics*, 112, 112–128.
23. Santos, R., & Oliveira, M. (2023). Using CMIP6 climate projections to update insurance payouts for drought-prone regions. *Climatic Change*, 176, 12.
24. Setiawan, D., Putra, M., & Wirawan, A. (2024). Bias correction of satellite rainfall for index-based crop insurance in Southeast Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(1), 1123–1139.
25. Tadesse, T., Haile, T., & Anderson, M. (2023). Thermal-based drought indices for parametric insurance using evapotranspiration anomalies. *Agricultural Water Management*, 285, 108291.
26. Wanjiku, E., & Kiplagat, R. (2025). Remote sensing–driven early warning systems for index insurance validation. *Frontiers in Climate*, 7, 123445.
27. Wheeler, D., & Caballero, R. (2024). Implementing seasonal climate forecasts for index insurance payout optimization. *Climatic Change*, 179, 44.
28. Wu, J., & Zhang, F. (2023). Improving wind hazard modelling for tropical cyclone parametric insurance using WRF ensemble simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(15), e2023JD039251.
29. Yamada, S., Ito, T., & Mori, K. (2023). Modelling tropical cyclone wind fields for parametric insurance applications in Japan. *Natural Hazards*, 119, 211–233.
30. Zhang, W., Li, K., & Han, Y. (2023). Multi-model ensemble predictions of extreme rainfall for parametric climate insurance in East Asia. *Environmental Modeling & Software*, 170, 105680.