

**Pengaruh Perubahan Iklim terhadap Siklus Kejadian Siklon Tropis
di Pasifik Selatan dan Utara*****The Effect of Climate Change on Tropical Cyclone Occurrence
in the South and North Pacific***

Putri Maulida, Samsul Anwar, Latifah Rahayu Siregar, Saiful Mahdi

Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief No.441, Kopelma Darussalam, Kec. Syiah Kuala,
Kota Banda Aceh, Aceh 23111, Indonesia

e-mail: samsul.anwar@usk.ac.id

Naskah diterima 20 September 2023, selesai direvisi 20 April 2024, dan disetujui 25 April 2024

ABSTRAK

Badai siklon tropis merupakan salah satu bencana alam berbahaya yang memengaruhi kehidupan, harta benda dan lingkungan. Meskipun Indonesia bukan merupakan daerah lintasan siklon tropis, namun keberadaan siklon tropis di sekitar wilayah Indonesia akan memengaruhi pembentukan pola cuaca di Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pengaruh perubahan iklim terhadap siklus kejadian siklon tropis dan membandingkan perubahan siklus kejadian siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara dengan *baseline* tahun 1950. Sebanyak 2.709 data siklus hidup siklon tropis dianalisis dengan menggunakan analisis survival model regresi Cox Proportional Hazard (Cox PH) dan Kaplan Meier. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan iklim berpengaruh signifikan terhadap kejadian siklon tropis. Kejadian siklon tropis sesudah tahun 1950 cenderung berlangsung lebih lama dibandingkan sebelum tahun 1950 (hazard rasio 1,489). Lebih rinci, siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan sesudah tahun 1950 juga berlangsung lebih lama (hazard rasio 1,463) dan memiliki kecepatan pergerakan yang lebih besar (hazard rasio 1,052) jika dibandingkan dengan siklon tropis yang terjadi sebelum tahun 1950 di wilayah tersebut. Selain itu, analisis deskriptif juga menunjukkan adanya peningkatan intensitas, durasi waktu, kecepatan dan jarak tempuh siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950.

Kata kunci: Cox proportional hazard, pasifik selatan dan utara, perubahan iklim, siklon tropis

ABSTRACT

Tropical cyclone (TC) is one of the most dangerous natural disasters that affect life, property and the environment. Although Indonesia is not a TC track, but the presence of TCs in the vicinity of Indonesia will affect the formation of weather patterns in Indonesia. This study aims to identify the effects of climate change on the cycle of TC events and to compare changes in the cyclone of TCs that occur in the South and North Pacific regions with a baseline in 1950. A total of 2,709 life cycle data for TCs were analyzed using the survival analysis regression model Cox Proportional Hazard (Cox PH) and Kaplan Meier. The results showed that climate change had a significant effect on the event of TCs. The occurrence of TCs after 1950 tends to last longer than before 1950 (hazard ratio 1.489). In more detail, TCs that occurred in the South Pacific region after 1950 also lasted longer (hazard ratio 1.463) and has a greater speed of movement (hazard ratio 1.052) when compared to TCs that occurred before 1950 in the region. In addition, descriptive analysis also shows an increase in the intensity, duration, speed and distance traveled by TCs that occurred after 1950.

Keywords: Cox proportional hazard, south and north pacific, climate change, tropical cyclone

PENDAHULUAN

Siklon tropis (*Tropical Cyclone/TC*) adalah fenomena cuaca alam ekstrim yang bergerak berputar dengan kecepatan di atas 30 m/s

yang membentuk kolom udara panjang dan berbentuk spiral. Badai siklon tropis merupakan salah satu bencana alam berbahaya yang mempengaruhi kehidupan, harta benda dan

lingkungan (Hoque drr., 2017). Topografi wilayah dan kekuatan siklon tropis merupakan beberapa faktor yang memengaruhi tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh bencana alam siklon tropis (Yonson drr., 2018).

Terdapat tiga wilayah berkembangnya siklon tropis secara teratur di wilayah Pasifik Selatan, yaitu Samudra Hindia, Barat Daya wilayah Australia, dan di cekungan Pasifik Selatan (WMO, 2020). Badai siklon tropis terbentuk di daerah lautan tropis yang hangat dengan perubahan iklim yang terjadi saat ini yang dibuktikan dengan adanya peningkatan suhu permukaan rata-rata global (Wu drr., 2016). Sejalan dengan hal tersebut, penelitian Garner drr. (2021) menjelaskan bahwa karakteristik siklon tropis pada masa pre-industrial berbeda dengan karakteristik siklon tropis pada masa modern dengan kadar emisi yang tinggi seperti yang terjadi saat ini.

Meskipun Indonesia bukan merupakan daerah lintasan siklon tropis, namun keberadaan siklon tropis di sekitar wilayah Indonesia, terutama yang terbentuk di sekitar Pasifik Utara bagian Barat Laut, Samudra Hindia Tenggara dan sekitar Australia akan mempengaruhi pembentukan pola cuaca di Indonesia. Perubahan pola cuaca yang disebabkan siklon tropis tersebut memberikan dampak tidak langsung terhadap kondisi cuaca di wilayah Indonesia (Surinati dan Kusuma, 2018). Sebagai contoh, *Tropical Cyclone Warning Centre (TCWC) Jakarta* mendeteksi adanya siklon tropis *Mangga* di Samudera Hindia pada 21 Mei 2020 yang berdampak secara tidak langsung terhadap wilayah Indonesia seperti mengakibatkan angin kencang dan hujan lebat yang menyebabkan terjadinya banjir dan tanah longsor. Beberapa wilayah yang dipengaruhi siklon tropis *Mangga* diantaranya adalah Sumatra Barat, Bengkulu, Lampung, Jawa Timur, Bali, Nusa Tenggara Barat, Kalimantan Selatan, dan Kalimantan Timur (Herizal, 2020).

Mempelajari perubahan siklus hidup siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Utara maupun Pasifik Selatan merupakan salah satu upaya

mitigasi bencana dampak siklon tropis terhadap wilayah Indonesia. Salah satu faktor yang dapat mengurangi tingkat fatalitas dari bencana siklon tropis tersebut adalah kesiapsiagaan dari pemerintah (Yonson drr., 2018). Beberapa variabel yang sering dianalisis dalam mempelajari risiko bencana siklon tropis adalah koordinat pusat siklon tropis, kecepatan maksimum, tekanan minimum di pusat siklon tropis dan urutan waktu kejadiannya (Yang drr., 2021). Selain itu, beberapa karakteristik lain dari siklon tropis yang sering dipelajari adalah posisi awal siklon tropis, jumlah kejadian pertahun, seasonalitas, akumulasi energi, jalur pergerakan dan jumlah hari yang mengalami badai (Camargo drr., 2005). Selain beberapa variabel yang disebutkan pada kedua penelitian tersebut, terdapat satu variabel penting lainnya yang dapat digunakan dalam upaya mitigasi bencana kejadian siklon tropis yaitu lamanya waktu terjadinya siklon tropis yang dihitung mulai dari awal pembentukan hingga siklon tropis tersebut menghilang. Durasi waktu tersebut merupakan fungsi dari beberapa indikator siklon tropis termasuk jarak tempuhnya. Semakin lama durasi waktu siklus hidup sebuah siklon tropis, maka semakin jauh jarak yang ditempuhnya sehingga semakin luas daerah yang terkena dampak dari siklon tropis tersebut.

Menurut Syaifullah (2015), terdapat empat tahapan siklus hidup siklon tropis yang dimulai dari tahap pembentukkan, tahap belum matang, tahap matang hingga tahap pelemahan atau berakhirnya siklon tropis. Lebih lanjut, Syaifullah (2015) menjelaskan bahwa tahap pembentukkan dimulai dengan adanya gangguan atmosfer yang ditandai dengan wilayah konvektif dengan awan *cumulonimbus*. Kemudian berkembang ke tahapan yang belum matang dengan kecepatan angin lebih dari 34 knot atau 63 km/jam yang mengelilingi pusat sirkulasi dan mulai tampak berbentuk mata siklon tropis. Pada tahap ketiga (matang), siklon tropis yang terbentuk sudah stabil untuk interval waktu tertentu yang terus bergerak sampai masuk ke tahap pelemahan. Pada tahap terakhir ini, siklon tropis yang ter-

bentuk mulai menghilang dan kondisi menjadi seperti semula.

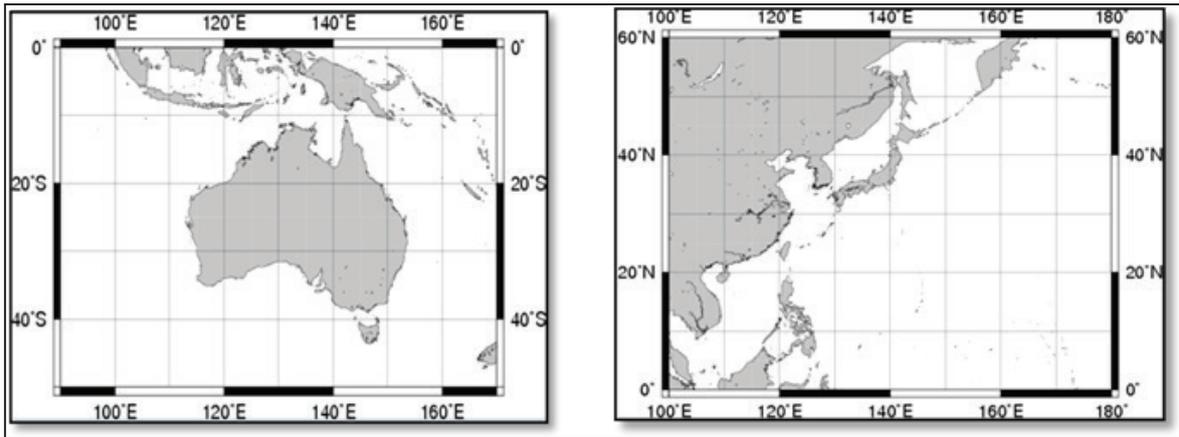
Dalam ilmu statistika, durasi waktu siklus hidup siklon tropis tersebut disebut dengan waktu survival. Salah satu metode yang sering digunakan dalam menganalisis waktu survival adalah analisis survival. Analisis survival adalah sebuah metode statistik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara durasi waktu terjadinya sebuah peristiwa dengan faktor-faktor penjelasnya. Sebaliknya, metode statistik lainnya secara umum tidak dapat digunakan untuk menganalisis waktu survival salah satunya karena adanya status sensor pada data waktu survival. Data dikatakan tersensor apabila hanya sebagian waktu survival yang diketahui dari sebuah objek penelitian. Secara umum terdapat tiga penyebab data dapat tersensor yaitu: penelitian telah berakhir namun tidak ada kejadian yang terjadi (*study end without event*), objek penelitian hilang dari pengamatan (*lost to follow-up*) dan objek penelitian dikeluarkan dari pengamatan karena alasan tertentu (*withdraws*). Penyebab pertama terjadi ketika sebuah penelitian telah berakhir namun objek yang diteliti belum mengalami kejadian. Penyebab kedua terjadi pada saat objek yang diteliti hilang dari pantauan sehingga tidak diketahui perkembangan dan keberadaannya. Sedangkan penyebab ketiga terjadi karena objek yang diteliti ditarik dari penelitian karena faktor lain seperti tidak bersedia melanjutkan penelitian atau mengalami kejadian lain selain yang menjadi fokus penelitian (Kleinbaum dan Klein, 2012).

Lebih rinci, analisis regresi *Cox Proportional Hazard* (Cox PH) merupakan salah satu metode yang paling sering dipakai dalam analisis survival. Regresi Cox PH merupakan salah satu metode semiparametrik dalam analisis survival. Metode ini tidak memerlukan informasi tentang distribusi yang mendasari waktu survival dan fungsi *baseline hazard* tidak harus ditentukan dalam proses estimasi parameternya (Kleinbaum dan Klein, 2012). Pada awalnya, metode dalam analisis survival berkembang dalam bidang kesehatan misalnya dalam proses perhitungan resiko kesembuhan sebuah penyakit pasca op-

erasi dilakukan. Dalam praktiknya, selain dalam bidang kesehatan, analisis survival juga sudah sering digunakan dalam menganalisis data dalam bidang lainnya termasuk dalam upaya mitigasi kejadian bencana alam seperti tsunami (Anwar, 2021) dan gempa bumi (Anwar, 2022; Anwar dr., 2022). Model Cox PH pada penelitian pertama mengenai tsunami mampu menjelaskan perbandingan risiko kejadian tsunami di Indonesia berdasarkan posisi garis khatulistiwa. Sedangkan pada penelitian kedua mengenai gempa bumi, analisis survival mampu menjelaskan perbandingan perilaku gempa bumi susulan di dua wilayah yang berbeda yaitu antara gempa bumi susulan Pidie Jaya (7 Desember 2016) dan Ambon (26 September 2019). Selanjutnya pada penelitian terakhir, analisis survival digunakan untuk mempelajari perilaku gempa bumi berurutan di wilayah Pulau Sumatra berdasarkan durasi waktu antar kejadiannya. Ketiga contoh penelitian tersebut menunjukkan bahwa analisis survival dapat diaplikasikan dalam mendukung upaya mitigasi bencana alam termasuk siklon tropis yang menjadi objek pada penelitian ini.

Tahun 1950 merupakan salah satu periode penting dalam memahami fenomena kejadian siklon tropis yang merupakan salah satu ancaman terbesar bagi masyarakat khususnya yang tinggal di wilayah pesisir (Gori dr., 2023). Hal ini salah satunya disebabkan oleh adanya peningkatan kadar CO₂ yang signifikan di atmosfer sejak tahun 1950an yang mengakibatkan terjadinya peningkatan suhu permukaan rata-rata global (NASA, 2022). Pemanasan global tersebut berpotensi menyebabkan terjadinya kekeringan secara global, gelombang panas, dan peningkatan frekuensi terjadinya badai siklon tropis (Wu dr., 2018).

Dengan pertimbangan bahwa data historis siklus hidup kejadian siklon tropis pada masa lalu dapat digunakan untuk mempelajari perubahan siklus hidup kejadian siklon tropis pada masa yang akan datang, maka penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan iklim terhadap siklus hidup kejadian siklon tropis dengan menggunakan analisis survival. Hal ini dapat dilakukan dengan cara membandingkan



Gambar 1. Peta Wilayah (a) Pasifik Selatan dan (b) Pasifik Utara Lokasi Amatan Siklon Tropis.

durasi siklus hidup kejadian siklon tropis yang terjadi sebelum dan sesudah tahun 1950 yang dipilih sebagai *baseline* di kedua wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara. Penelitian ini merupakan salah satu upaya mitigasi bencana siklon tropis yang berdampak langsung maupun tidak langsung terhadap wilayah Indonesia yang mungkin terjadi pada masa yang akan datang.

Untuk menjawab apakah perubahan iklim memengaruhi siklus hidup kejadian siklon tropis, maka penelitian ini menggunakan empat model perbandingan untuk menganalisis durasi waktu siklus hidup siklon tropis yang dibedakan berdasarkan lokasi dan waktu kejadiannya. Pada perbandingan pertama, siklus kejadian siklon tropis hanya dibedakan berdasarkan lokasi kejadiannya yaitu wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara. Pada

perbandingan kedua, siklus siklon tropis hanya dibedakan berdasarkan waktu kejadiannya yaitu sebelum dan sesudah tahun 1950 yang dipilih sebagai *baseline*. Selanjutnya, perbandingan ketiga membandingkan siklus siklon tropis di wilayah Pasifik Selatan sebelum dan sesudah tahun 1950. Perbandingan terakhir (keempat) membandingkan siklus siklon tropis di wilayah Pasifik Selatan dan Utara sesudah tahun 1950. Sebagai catatan, terdapat dua kemungkinan model perbandingan lainnya, yaitu perbandingan siklus siklon tropis di wilayah Pasifik Utara sebelum dan sesudah tahun 1950, dan perbandingan siklus siklon tropis di wilayah Pasifik Selatan dan Utara sebelum tahun 1950. Akan tetapi, kedua kemungkinan perbandingan tersebut tidak dapat dianalisis karena berdasarkan data NII (2023), siklon tropis di wilayah

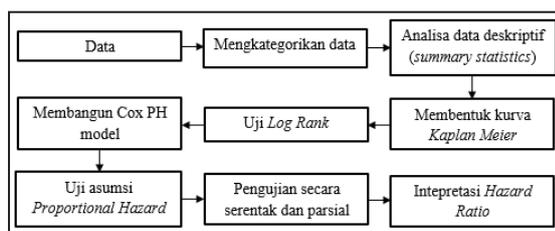
Tabel 1. Variabel dan rancangan model penelitian

Model Perbandingan	Variabel	Jumlah Sampel Siklon Tropis
Perbandingan 1 (Pasifik Selatan dan Pasifik Utara)	Y = Durasi (hari) X ₁₍₁₎ = Jalur X ₂₍₁₎ = Jarak (km) X ₃₍₁₎ = Kecepatan (km/jam)	2.709
Perbandingan 2 (sesudah dan sebelum tahun 1950)	Y = Durasi (hari) X ₁₍₂₎ = Jalur X ₂₍₂₎ = Jarak (km) X ₃₍₂₎ = Kecepatan (km/jam)	2.709
Perbandingan 3 (sesudah dan sebelum tahun 1950 wilayah Pasifik Selatan)	Y = Durasi (hari) X ₁₍₃₎ = Jalur dan Waktu X ₂₍₃₎ = Jarak (km) X ₃₍₃₎ = Kecepatan (km/jam)	910
Perbandingan 4 (sesudah tahun 1950 wilayah Pasifik Selatan dan sesudah tahun 1950 wilayah Pasifik Utara)	Y = Durasi (hari) X ₁₍₄₎ = Jalur dan Waktu X ₂₍₄₎ = Jarak (km) X ₃₍₄₎ = Kecepatan (km/jam)	2.496

Pasifik Utara tercatat hanya terjadi setelah tahun 1950. Sehingga perbandingan yang melibatkan kejadian siklon tropis di wilayah Pasifik Utara sebelum tahun 1950 tidak dapat dilakukan. Secara lebih sederhana, rancangan model dalam penelitian ini dapat ditampilkan pada Tabel 1.

Variabel respon yang dianalisis dalam penelitian ini adalah durasi waktu hidup siklon tropis mulai dari awal pembentukan hingga menghilang yang diukur dalam satuan hari. Sedangkan variabel prediktor yang diduga memengaruhi durasi waktu hidup siklon tropis tersebut adalah jalur atau wilayah kejadian (Pasifik Selatan dan Pasifik Utara), jarak tempuh siklon tropis mulai dari titik awal pembentukan hingga titik siklon tropis menghilang yang diukur dalam satuan km dan kecepatan pergerakan siklon tropis yang diukur dalam satuan km/jam.

Data historis durasi waktu hidup siklon tropis dianalisis dengan menggunakan metode survival model Cox PH untuk mengkonfirmasi apakah perubahan iklim berpengaruh terhadap siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara dengan menggunakan empat skenario perbandingan yang telah dijabarkan sebelumnya. Selain menggunakan model Cox PH, nilai fungsi survival data siklus hidup siklon tropis berdasarkan keempat model perbandingan juga akan dianalisis dengan metode non-parametrik *Kaplan-Meier*. Lebih lanjut, perbedaan kurva survival *Kaplan-Meier* akan dianalisis melalui pengujian *Log Rank test*. Penelitian ini diharapkan dapat membantu proses mitigasi bencana siklon tropis di Indonesia pada khususnya dan di dunia pada umumnya. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan *software R* versi 3.6.2 menggunakan *package "survival"*.



Gambar 2. Flowchart Pengolahan Data Penelitian.

Secara umum, proses analisis data dalam penelitian ini dapat dijabarkan ke dalam delapan tahapan utama (Gambar 2) . Pertama, mengkategorikan data penelitian berdasarkan rancangan model penelitian pada Tabel 1. Kedua, menggambarkan dan mengeksplorasi data penelitian melalui *summary statistics* (nilai minimum, maksimum, *mean*, median, dan standar deviasi) dan plotting data. Ketiga, menghitung nilai fungsi survival *Kaplan Meier* dan memvisualisasikannya ke dalam bentuk kurva berdasarkan keempat model perbandingan yang telah ditentukan sebelumnya (Tabel 1). Keempat, melakukan pengujian *Log Rank test* terhadap kurva *Kaplan-Meier* untuk melihat ada tidaknya perbedaan antar kurva survival berdasarkan keempat model perbandingan yang telah ditentukan sebelumnya.

Pada tahapan kelima, model Cox PH dibangun untuk keempat rancangan model perbandingan. Setiap model perbandingan terdiri dari satu variabel respon dan tiga variabel prediktor, sehingga terdapat tujuh kemungkinan model yang dapat dibangun untuk setiap model perbandingannya. Pada kemungkinan pertama, ketiga variabel prediktor (jalur, jarak, dan kecepatan) dimasukkan ke dalam model. Kemungkinan kedua terdiri dari dua variabel prediktor: jalur dan jarak, kemungkinan ketiga terdiri dua variabel prediktor yaitu jalur dan kecepatan dan kemungkinan keempat juga terdiri dari dua variabel prediktor (jarak dan kecepatan). Selanjutnya kemungkinan kelima hingga ketujuh masing-masing hanya terdiri dari satu variabel prediktor yang berbeda-beda yaitu jalur (kemungkinan 5), jarak (kemungkinan 6), dan variabel kecepatan (kemungkinan 7). Keenam, melakukan pengujian asumsi *Proportional Hazard* (PH) untuk setiap kombinasi kemungkinan model pada keempat model perbandingan dengan menggunakan metode *goodness of fit* melalui uji *residual schoenfeld*. Dari ketujuh kemungkinan model yang ada, akan dipilih satu model terbaik yaitu model dengan variabel prediktor yang memenuhi asumsi PH terbanyak untuk masing-masing model perbandingan yang ada.

Pada tahap ketujuh, setelah diperoleh model terbaik (yang memenuhi asumsi) dari masing-masing perbandingan, maka selanjutnya dilakukan uji serentak dengan menggunakan *Likelihood Ratio* (LR) dan uji parsial dengan menggunakan statistik *Wald*. Kedua pengujian tersebut dilakukan untuk melihat ada tidaknya pengaruh variabel prediktor terhadap model. Kedelapan, menghitung dan menginterpretasi nilai *Hazard Ratio* (HR) dari masing-masing model perbandingan terbaik untuk mengkonfirmasi apakah perubahan iklim memengaruhi siklus hidup kejadian siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara.

Analisis survival merupakan kumpulan metode statistika dimana variabel yang diperhatikan adalah waktu sampai terjadinya peristiwa (*event*) yang biasa disebut waktu survival (Kleinbaum dan Klein, 2012). Dalam analisis survival terdapat model parametrik, non parametrik dan semiparametrik. Model *Cox Proportional Hazard* (Cox PH) merupakan salah satu model dalam analisis survival yang sering digunakan dalam menganalisis data survival. Model Cox PH merupakan model semiparametrik karena tidak memerlukan informasi tentang distribusi yang mendasari waktu survival dan untuk mengestimasi parameter *Proportional Hazard* tidak harus menentukan fungsi *hazard* dasar (*baseline hazard*) (Gou, 2010). Selain itu, estimasi parameternya juga hanya melibatkan data yang mengalami kejadian saja (tidak tersensor). Bentuk umum model Cox PH secara matematis dapat dituliskan dalam Persamaan 1 (Kleinbaum dan Klein, 2012):

$$h(t, X) = h_0(t) \exp(\sum_{i=1}^p \beta_i X_i), \text{ dengan } i = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

Dimana:

$h_0(t)$ = Fungsi *baseline hazard*

β_i = Koefisien model Cox PH variabel prediktor ke - i

X_i = Variabel prediktor ke - i

Estimasi nilai *hazard* rasio (HR) diperoleh dengan mengeksponensialkan koefisien dari variabel prediktornya. Secara umum *hazard*

rasio didefinisikan sebagai perbandingan *hazard* dari dua buah kelompok, biasanya antara kelompok dengan nilai *hazard* yang lebih besar (X^*) dengan kelompok yang bernilai *hazard* lebih kecil (X). *Hazard* rasio dapat ditulis secara matematis dalam Persamaan 2.

$$\widehat{HR} = \frac{\widehat{h}(t, X^*)}{\widehat{h}(t, X)} = \frac{\widehat{h}_0(t) e^{\sum_{i=1}^p \widehat{\beta}_i x_i^*}}{\widehat{h}_0(t) e^{\sum_{i=1}^p \widehat{\beta}_i x_i}} = e^{\sum_{i=1}^p \widehat{\beta}_i (x_i^* - x_i)} \dots (2)$$

Dimana:

$X^* = (X_1^*, X_2^*, \dots, X_p^*)$, himpunan variabel prediktor untuk kelompok dengan nilai *hazard* yang lebih besar.

$X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$, himpunan variabel prediktor untuk kelompok dengan nilai *hazard* yang lebih kecil.

Dalam model Cox PH, terdapat tiga pengujian statistik yang harus dilakukan yaitu pengujian asumsi *Proportional Hazard* (PH) melalui statistik *Chi Square* yang menggunakan *residual schoenfeld*, pengujian secara serentak melalui statistik *Likelihood Ratio* (LR) test, dan pengujian secara parsial melalui statistik *Wald*. Pengujian asumsi *Proportional Hazard* (PH) dikatakan terpenuhi apabila pengujian *Chi-square* menghasilkan *p-value* pengujian yang lebih besar dari pada tingkat signifikansi (α) sebesar 5%. Sedangkan pengujian serentak dan parsial dikatakan signifikan apabila menghasilkan *p-value* pengujian yang lebih kecil dari pada tingkat signifikansi (α) sebesar 5%.

Metode *Kaplan Meier* dapat digunakan untuk mengestimasi nilai fungsi survival. Metode ini merupakan salah satu analisis nonparametrik dalam analisis survival, karena dalam metode ini tidak membutuhkan asumsi distribusi dari waktu survival (Collett, 1994). Menurut Kleinbaum dan Klein (2012), persamaan umum fungsi survival ($S(t)$) *Kaplan Meier* pada waktu kegagalan t dapat dituliskan dalam Persamaan 3.

$$\widehat{S}(t_{(t)}) = \prod_{i=1}^t \widehat{P}_r [T > t_{(t)} | T \geq \dots] \dots \dots \dots (3)$$

Uji *Log Rank* merupakan uji yang digunakan untuk membandingkan kurva survival dari

beberapa kelompok observasi yang berbeda (Kleinbaum dan Klein, 2012). *Log Rank test* menggunakan perbandingan antara nilai observasi (O) dengan nilai ekspektasi (E) dari setiap kelompok variabel penjelasnya. Secara matematis, *Log Rank test* dapat ditulis dengan Persamaan 4.

$$\text{Log - rank statistic} = \frac{(O_i - E_i)^2}{\text{Var}(O_i - E_i)} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana $\text{Var}(O_i - E_i)$ menunjukkan variansi selisih antara nilai observasi dan nilai ekspektasi pada kelompok ke- i .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini dideskripsikan data penelitian berdasarkan pembagian wilayah dan waktu terjadinya siklon tropis dengan empat kemungkinan model perbandingan yang telah dijelaskan sebelumnya. Statistik deskriptif data siklon tropis variabel kategorik yang dideskripsikan berdasarkan wilayah dan waktu kejadian siklon tropis disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2, diketahui bahwa kejadian siklon tropis lebih banyak terjadi di wilayah Pasifik Utara (1.799 kali atau sekitar 66,41%) jika dibandingkan dengan wilayah Pasifik Selatan (910 kali atau 33,59%). Model perbandingan 2 menunjukkan bahwa mayoritas (92,14%) kejadian siklon tropis terjadi sesudah tahun 1950. Lebih rinci, model perbandingan 3 menunjukkan bahwa dari 910 kejadian siklon tropis di wilayah Pasifik Selatan, sekitar 76,59% diantaranya juga terjadi sesudah tahun 1950 tersebut. Terakhir, apabila perbandingan tersebut dilakukan dengan hanya menggunakan kejadian setelah tahun 1950, dapat diketahui bahwa sekitar 72% dari total kejadian siklon tropis setelah tahun 1950 terjadi di wilayah Pasifik Utara (model perbandingan 4). Selanjutnya, gambaran perbandingan durasi waktu hidup siklon tropis, jarak tempuh, dan kecepataannya untuk keempat model perbandingan ditampilkan dalam bentuk *boxplot* pada Gambar 3.

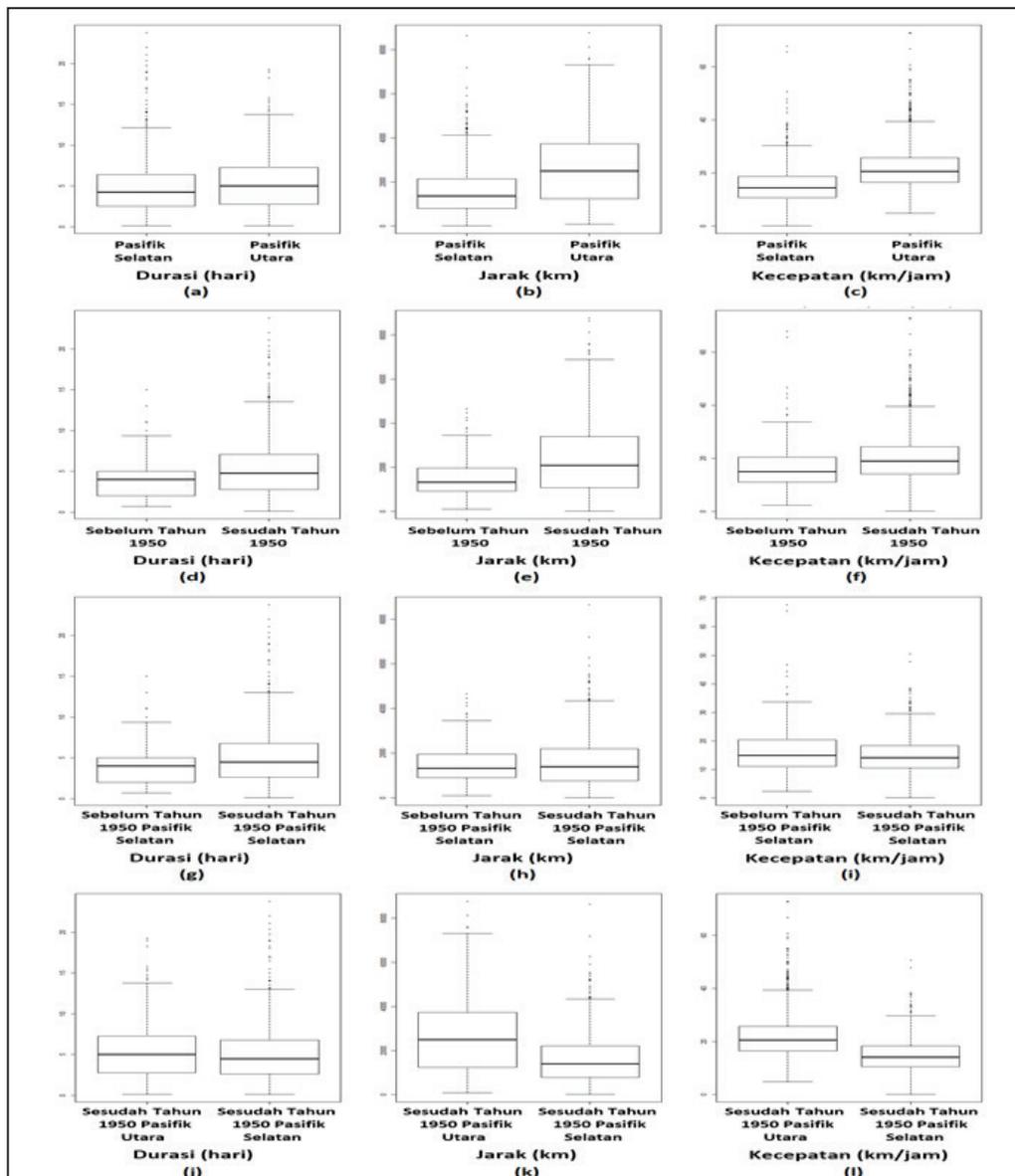
Gambar 3.a hingga Gambar 3.c menunjukkan bahwa secara umum rata-rata durasi waktu

siklus hidup (mulai dari terbentuk hingga menghilang), jarak yang ditempuh, dan kecepatan tempuh siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Utara terlihat lebih besar dari pada siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan. Siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Utara memiliki rata-rata durasi hidup sekitar 5,23 hari mulai dari awal pembentukannya hingga siklon tropis tersebut menghilang. Rata-rata jarak tempuh yang dilalui siklon tropis di wilayah Pasifik Utara adalah sepanjang 1.604 Km dengan kecepatan tempuh rata-rata sebesar 15,40 Km/jam. Selanjutnya apabila dikaitkan dengan variabel waktu sebelum dan sesudah tahun 1950, terlihat bahwa durasi, jarak, dan kecepatan siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950 secara rata-rata terlihat lebih besar dari pada sebelum tahun 1950, baik untuk perbandingan 2 (secara keseluruhan (Gambar 3.d hingga Gambar 3.f)) maupun untuk perbandingan 3 (khusus di wilayah Pasifik Selatan (Gambar 3.g hingga Gambar 3.i)). Secara umum, siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950 mengalami peningkatan durasi hidup sekitar 27% menjadi 5,24 hari dari 4,12 hari rata-rata siklus hidup siklon tropis sebelum tahun 1950. Selanjutnya, jarak tempuh dan kecepatan rata-rata siklon tropis juga mengalami peningkatan setelah tahun 1950 masing-masing sebesar 59% dan 19%.

Sedangkan untuk perbandingan 4, durasi waktu hidup siklon tropis setelah tahun 1950 terlihat hampir sama antara yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara (Gambar 3.j). Akan tetapi, jarak (Gambar 3.k) dan kecepatan (Gambar 3.l) siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Utara terlihat jauh lebih besar dari pada siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan. Siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950 di wilayah Pasifik Utara memiliki jarak tempuh 1,6 kali lebih panjang dari pada siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan pada periode waktu yang sama. Selain itu, siklon tropis di wilayah Pasifik Utara juga memiliki kecepatan yang lebih besar 1,4 kali dibandingkan dengan siklon tropis yg terjadi di wilayah Pasifik Selatan setelah

Tabel 2. Karakteristik data siklon tropis variabel kategorik

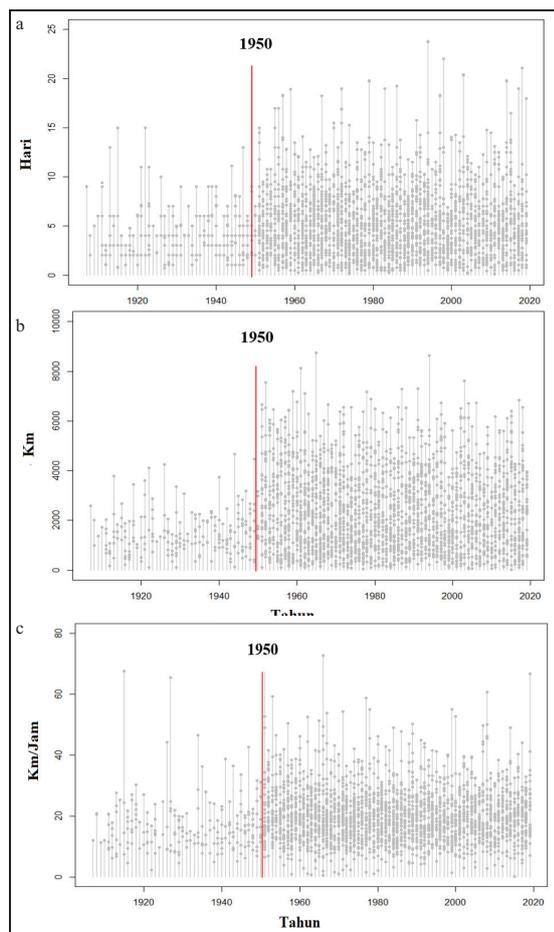
Variabel	Keterangan	Frekuensi	Persentase (%)
Perbandingan 1	Pasifik Selatan (0)	910	33,59
	(Jalur) Pasifik Utara (1)	1.799	66,41
Perbandingan 2	Sebelum tahun 1950 (1)	213	7,86
	(Waktu) Sesudah tahun 1950 (0)	2.496	92,14
Perbandingan 3	Sebelum tahun 1950 di wilayah Pasifik Selatan (1)	213	23,41
	(Jalur dan waktu) Sesudah tahun 1950 di wilayah Pasifik Selatan (0)	697	76,59
Perbandingan 4	Sesudah tahun 1950 di wilayah Pasifik Selatan (0)	697	27,92
	(Jalur dan waktu) Sesudah tahun 1950 di wilayah Pasifik Utara (1)	1.799	72,08



Gambar 3. Durasi, Jarak, dan Kecepatan Siklon Tropis pada Keempat Model Perbandingan.

tahun 1950. Selanjutnya, selain ditampilkan secara terpisah untuk masing-masing model perbandingan, gambaran durasi, jarak tempuh,

dan kecepatan siklon tropis selama periode penelitian juga ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.



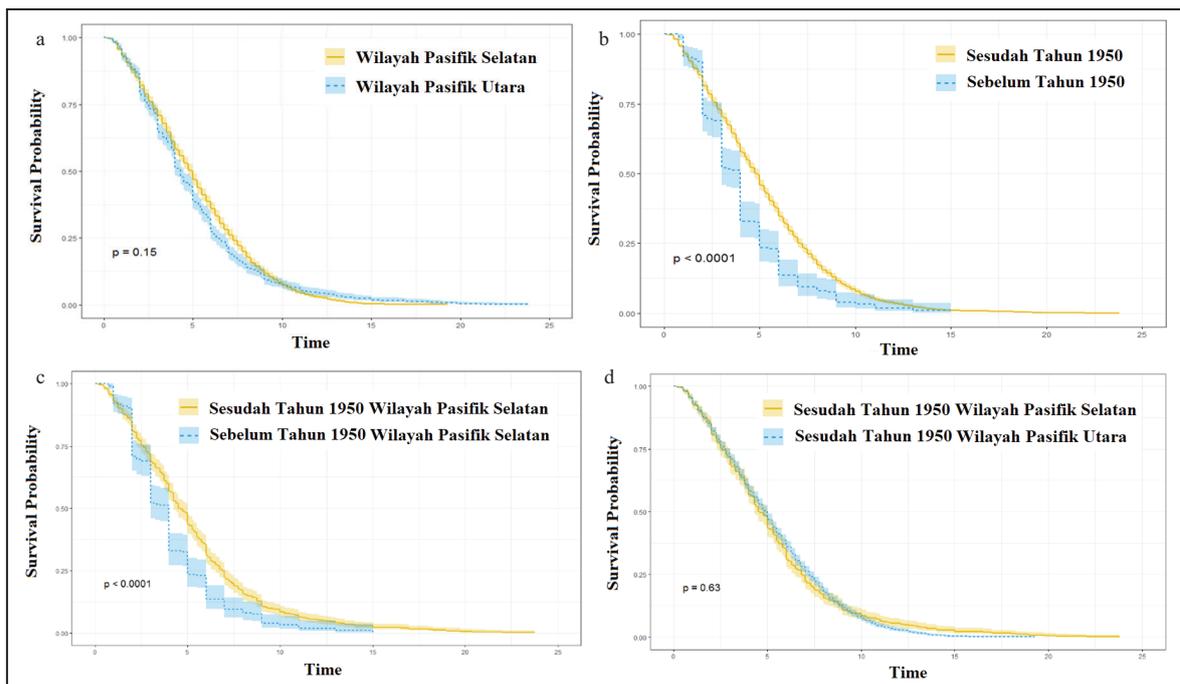
Gambar 4. Diagram garis (a) durasi siklon tropis, b) jarak siklon tropis, (c) kecepatan siklon tropis.

Gambar 4 menyajikan perbandingan durasi waktu hidup (Gambar 4.a), jarak tempuh (Gambar 4.b), dan kecepatan (Gambar 4.c) siklon tropis yang terjadi di kedua wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara selama periode waktu pengamatan (tahun 1907 sampai dengan tahun 2019). Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950 cenderung memiliki durasi waktu siklus hidup yang lebih lama, jarak tempuh yang lebih jauh, kecepatan yang lebih besar dan dengan frekuensi kejadian yang lebih banyak dibandingkan sebelum tahun 1950.

Kurva survival *Kaplan Meier* digunakan untuk mengetahui karakteristik survival kejadian siklon tropis berdasarkan durasi waktu siklus hidup siklon tropis pada keempat model perbandingan yang dianalisis. Selain itu, pengujian *Log Rank*

juga dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan kurva survival dalam setiap model perbandingan tersebut. Gambar 5 memuat kurva survival *Kaplan-Meier* berserta *p-value* hasil pengujian *Log Rank test* terhadap masing-masing model perbandingan yang dianalisis.

Berdasarkan Gambar 5, diketahui bahwa secara umum kurva survival kejadian siklon tropis memiliki pola menurun yang cepat mulai dari awal waktu pengamatan (hari pertama) hingga sekitar sepuluh hari. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum mayoritas siklon tropis yang dianalisis dalam penelitian ini cenderung berakhir dalam kurun waktu sekitar sepuluh hari sejak awal pembentukan. Selain itu, Gambar 5 juga menunjukkan perbandingan kurva survival antar dua kategori dalam setiap gambarnya yang berdasarkan pada model perbandingan yang telah dijelaskan sebelumnya. Gambar 5.a dan Gambar 5.d menunjukkan bahwa kurva survival pada model perbandingan 1 dan 4 terlihat sama antara kedua kategori yang dibandingkan. Pada model perbandingan 1, kurva survival siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan terlihat mirip dengan yang terjadi di wilayah Pasifik Utara. Demikian juga antara kurva survival siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Utara sesudah tahun 1950 dengan yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan pada periode waktu yang sama. Sedangkan kurva survival siklon tropis yang terjadi sebelum tahun 1950 dengan yang terjadi sesudah tahun 1950 (Gambar 5.b untuk model perbandingan 2) terlihat berbeda terutama pada durasi hidup siklon tropis sekitar empat hingga sepuluh hari. Perbedaan kurva survival tersebut juga terlihat pada siklon tropis yang terjadi sebelum dan sesudah tahun 1950 khusus di wilayah Pasifik Selatan (Gambar 5.c untuk model perbandingan 3). Selanjutnya, pengujian *Log-Rank test* membuktikan bahwa perbedaan kedua kurva survival pada Gambar 5.b dan 5.c tersebut signifikan secara statistik ($p\text{-value} < 0,001$). Sedangkan kedua kurva survival yang dibandingkan masing-masing pada Gambar 5.a dan 5.d tidak berbeda signifikan berdasarkan pengujian *Log-Rank test* tersebut. Dengan kata



Gambar 5. Kurva survival Kaplan Meier siklon tropis (a) model perbandingan 1, (b) model perbandingan 2, (c) model perbandingan 3, dan (d) model perbandingan 4.

lain, perubahan iklim terindikasi telah memengaruhi peluang survival kejadian siklon tropis baik secara umum di kedua wilayah (Model perbandingan 2) maupun khusus di wilayah Pasifik Selatan saja (model perbandingan 3).

Sebelum membangun model Cox PH, terlebih dahulu dilakukan pengujian asumsi *Proportional Hazard* (PH). Sebuah model Cox PH yang memenuhi asumsi PH menunjukkan bahwa *hazard* rasio bernilai konstan terhadap waktu (Kleinbaum dan Klein, 2012). Pengujian asumsi PH dilakukan pada semua kombinasi kemungkinan model dengan tiga variabel prediktor pada setiap model perbandingannya. Dengan demikian, terdapat masing-masing tujuh kemungkinan model untuk setiap perbandingannya. Metode pengujian asumsi PH yang digunakan adalah uji *goodness of fit*. Metode *goodness of fit* dilakukan dengan cara mencari korelasi antara *residual schoenfeld* dan *rank* waktu survival (Kleinbaum dan Klein, 2012). Tabel 3 dan 4 menyajikan hasil dari pengujian asumsi PH dari ketujuh kombinasi model untuk setiap model perbandingan yang dibandingkan (perbandingan 1 hingga 4).

Berdasarkan hasil pengujian asumsi PH pada Tabel 3 dan 4 diketahui bahwa dari ketujuh kemungkinan model pada perbandingan 1 dan perbandingan 4, tidak ada satupun kemungkinan model yang setiap variabel prediktornya memenuhi asumsi PH ($p\text{-value} > 0,05$). Sedangkan untuk perbandingan 2 dan 3, terdapat beberapa kemungkinan model yang variabel prediktornya memenuhi asumsi PH ($p\text{-value} > 0,05$). Berdasarkan Tabel 3, diketahui bahwa terdapat tiga kemungkinan model dengan minimal satu variabel prediktor yang memenuhi asumsi PH pada model perbandingan 2 yaitu kemungkinan model pertama, ketiga dan kelima. Dari ketiga kemungkinan model tersebut, hanya kemungkinan model 5 yang semua variabel prediktornya memenuhi asumsi PH. Sehingga kemungkinan model 5 yang akan dianalisis lebih lanjut untuk model perbandingan 2. Selanjutnya untuk model perbandingan 3 (Tabel 4), juga terdapat tiga kemungkinan model dengan minimal satu variabel prediktor yang memenuhi asumsi PH yaitu kemungkinan model kedua, ketiga dan kelima. Dari ketiga kemungkinan model tersebut, terdapat dua kemungkinan model

Tabel 3. Hasil pengujian asumsi PH model perbandingan 1 dan 2

Kemungkinan Model	Perbandingan 1		Perbandingan 2	
	Chi-square	P-value	Chi-square	P-value
1. Model 1 (Jalur + Jarak + Kecepatan)				
Jalur	340,0	<0,001	1,4	0,240
Jarak (km)	1793,0	<0,001	1759,4	<0,001
Kecepatan (km/jam)	1629,0	<0,001	1601,7	<0,001
2. Model 2 (Jalur + Jarak)				
Jalur	117,0	<0,001	3,9	0,047
Jarak (km)	779,0	<0,001	763,3	<0,001
3. Model 3 (Jalur + Kecepatan)				
Jalur	15,0	<0,001	0,7	0,413
Kecepatan (km/jam)	12,7	<0,001	7,5	0,006
4. Model 4 (Jarak + Kecepatan)				
Jarak (km)	1740,0	<0,001	1753,0	<0,001
Kecepatan (km/jam)	1600,0	<0,001	1584,0	<0,001
5. Model 5 (Jalur)				
Jalur	13,1	<0,001	1,4	0,230
6. Model 6 (Jarak)				
Jarak (km)	761,0	<0,001	761,0	<0,001
7. Model 7 (Kecepatan)				
Kecepatan (km/jam)	6,0	0,014	5,9	0,015

Tabel 4. Hasil pengujian asumsi PH model perbandingan 3 dan 4

Kemungkinan Model	Perbandingan 3		Perbandingan 4	
	Chi-square	P-Value	Chi-square	P-Value
1. Model 1 (Jalur dan waktu + Jarak + Kecepatan)				
Jalur	16,6	<0,001	339,0	<0,001
Jarak (km)	437,8	<0,001	1651,0	<0,001
Kecepatan (km/jam)	182,4	<0,001	1532,0	<0,001
2. Model 2 (Jalur dan waktu + Jarak)				
Jalur	0,1	0,800	95,4	<0,001
Jarak (km)	185,7	<0,001	718,5	<0,001
3. Model 3 (Jalur dan waktu + Kecepatan)				
Jalur	0,02	0,880	11,3	<0,001
Kecepatan (km/jam)	1,2	0,280	13,7	<0,001
4. Model 4 (Jarak + Kecepatan)				
Jarak (km)	427,0	<0,001	1606,0	<0,001
Kecepatan (km/jam)	161,0	<0,001	1460,0	<0,001
5. Model 5 (Jalur dan waktu)				
Jalur	0,4	0,550	8,7	0,003
6. Model 6 (Jarak)				
Jarak (km)	181,0	<0,001	704,0	<0,001
7. Model 7 (Kecepatan)				
Kecepatan (km/jam)	16,6	<0,001	9,2	0,003

yang semua variabel prediktornya memenuhi asumsi PH yaitu kemungkinan model ketiga dan kelima. Berdasarkan jumlah variabel prediktor yang memenuhi asumsi PH terbanyak dalam setiap modelnya, maka kemungkinan model 3 yang akan dianalisis lebih lanjut untuk model perbandingan 3.

Untuk selanjutnya, kemungkinan model 5 perbandingan 2 disebut sebagai model terbaik perbandingan 2, dan kemungkinan model 3 perbandingan 3 disebut sebagai model terbaik

perbandingan 3. Estimasi parameter, pengujian signifikansi parameter secara serentak dan parsial dilakukan terhadap model terbaik perbandingan 2 dan 3 berdasarkan hasil pengujian asumsi PH yang telah dilakukan sebelumnya. Model Cox PH beserta hasil pengujian signifikansi parameter untuk kedua model tersebut disajikan pada Tabel 5.

Berdasarkan Tabel 5, model Cox PH terbaik untuk kedua model perbandingan tersebut dapat ditulis dalam Persamaan 5 dan 6.

Tabel 5. Model Cox PH terbaik dan pengujian signifikansi parameter

Model	Variabel Prediktor	Beta	Hazard Ratio	Wald	p-value
Perbandingan 2	X ₁ (Waktu)				
	0: Sesudah tahun 1950 (R) 1: Sebelum tahun 1950	0,380	1,489	31	<0,001
Perbandingan 3	X ₁ (Waktu dan Jalur)				
	0: Sesudah tahun 1950 Pasifik Selatan (R) 1: Sebelum tahun 1950 Pasifik Selatan	0,380	1,463	24	<0,001
	X ₃ (Kecepatan)	0,051	1,052	96	<0,001

Likelihood Ratio test = 22,7^a dan 108,1^b; p-value = <0,001^a dan p-value = <0,001^b; (R): Reference kategori

Model terbaik perbandingan 2

$$h(t, X) = h_0(t) \exp(0,380X_1) \dots\dots\dots (5)$$

Model terbaik perbandingan 3

$$h(t, X) = h_0(t) \exp(0,39X_1 + 0,051X_3) (6)$$

Tabel 5 menunjukkan bahwa uji serentak melalui *Likelihood Ratio test* untuk kedua model Cox PH terbaik tersebut signifikan secara statistik (*p-value* < 0,05) dengan nilai *Likelihood Ratio test* masing-masing sebesar 22,7 dan 108,1. Selanjutnya, pengujian secara parsial melalui statistik *Wald* untuk model terbaik perbandingan 2 menunjukkan bahwa variabel waktu (sebelum tahun 1950 dibandingkan dengan sesudah tahun 1950) signifikan dengan nilai *p-value* yang lebih kecil dari pada 0,05. Sejalan dengan hasil tersebut, pengujian secara parsial untuk model final perbandingan 3 juga menunjukkan bahwa kedua variabel prediktor yang ada dalam model yaitu variabel jalur dan waktu (sebelum tahun 1950 wilayah Pasifik Selatan dibandingkan dengan sesudah tahun 1950 wilayah Pasifik Selatan) dan kecepatan juga signifikan dengan nilai *p-value* yang lebih kecil dari pada 0,05.

Nilai *hazard ratio* variabel prediktor waktu pada model terbaik perbandingan 2 menunjukkan bahwa siklon tropis yang terjadi sebelum tahun 1950 cenderung mengalami peningkatan potensi sebesar 48,9% (1,489-1) untuk lebih cepat hilang (berakhir) dibandingkan dengan siklon tropis yang terjadi setelah tahun 1950. Selanjutnya, nilai *hazard ratio* variabel prediktor waktu dan jalur pada model terbaik perbandingan 3 menunjukkan bahwa siklon tropis yang terjadi

di wilayah Pasifik Selatan sebelum tahun 1950 cenderung mengalami peningkatan potensi sebesar 46,3% (1,463-1) untuk lebih cepat hilang (berakhir) dibandingkan siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950 di wilayah yang sama. Sedangkan nilai *hazard ratio* variabel kecepatan menunjukkan bahwa siklon tropis dengan selisih kecepatan sebesar satu km/jam yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan cenderung mengalami peningkatan potensi sebesar 5,2% (1,052-1) untuk lebih cepat hilang. Sebagai ilustrasi, siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan dengan kecepatan sebesar 15 km/jam cenderung mengalami peningkatan potensi sebesar 5,2% untuk lebih cepat hilang (berakhir) dibandingkan siklon tropis dengan kecepatan sebesar 14 km/jam. Demikian juga halnya antara siklon tropis dengan kecepatan 13 km/jam dan 12 km/jam. Siklon tropis dengan kecepatan 13 km/jam berpotensi 5,2% untuk lebih cepat berakhir jika dibandingkan dengan siklon tropis yang berkekuatan 12 km/jam.

Berdasarkan hasil analisa model Cox PH yang telah dilakukan sebelumnya, diketahui bahwa perubahan iklim yang terjadi berpengaruh secara signifikan terhadap kejadian siklon tropis. Hal ini ditandai dengan adanya pengaruh dari variabel waktu (sebelum dan sesudah tahun 1950) terhadap durasi siklus hidup siklon tropis, baik secara keseluruhan di kedua wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara (perbandingan 2) maupun khusus pada wilayah Pasifik Selatan saja (perbandingan 3). Lebih lanjut, perbandingan 3 juga menunjukkan bahwa perubahan iklim juga turut mempengaruhi kecepatan dari siklon tropis yang terjadi di wilayah tersebut.

Di sisi lain, ketika dilakukan perbandingan siklon tropis di kedua wilayah tanpa mempertimbangkan faktor waktu (perbandingan 1), diperoleh hasil bahwa model yang akan dibangun tidak memenuhi asumsi PH. Hal ini menunjukkan bahwa *hazard ratio* kejadian siklon tropis di kedua wilayah bergantung pada waktu pengamatannya. Selain itu, siklus siklon tropis yang terjadi di kedua wilayah mungkin tidak berbeda signifikan terhadap durasi siklus siklon tropis, jarak yang ditempuh, dan kecepatannya (perbandingan 1). Selanjutnya, pelanggaran asumsi PH pada perbandingan 4 juga menunjukkan bahwa *hazard ratio* kejadian siklon tropis di kedua wilayah sesudah tahun *baseline* (1950) juga bergantung pada waktu pengamatannya. Kejadian siklon tropis sesudah tahun 1950 mungkin tidak memiliki karakter (durasi, jarak, dan kecepatan) yang berbeda antara yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan dan Pasifik Utara. Temuan ini juga didukung oleh hasil pengujian *Log Rank test* terhadap kurva *survival Kaplan-Meier* keempat perbandingan model yang telah dilakukan sebelumnya.

Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa lama waktu hidup (siklus) siklon tropis yang meningkat sesudah tahun 1950 di wilayah Pasifik Utara maupun Pasifik Selatan dipengaruhi oleh adanya perubahan iklim yang ditandai dengan pemanasan global yang terjadi hingga saat ini. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Suryantoro (2009) yang melihat korelasi antara jumlah kejadian siklon tropis dengan anomali suhu permukaan laut di sekitar wilayah Supadio, Pontianak (0,15°LS; 109,40°BT) dengan rentang pengamatan antara tahun 1973-2006, dan di wilayah Kemayoran, Jakarta (0,15°LS; 109,40°BT) dengan rentang pengamatan antara tahun 1951-2002. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya indikasi bahwa pemanasan global dapat menyebabkan terjadinya peningkatan intensitas fenomena cuaca alam ekstrim siklon tropis.

Sejalan dengan hasil penelitian tersebut, penelitian Kang dan Elsner (2015) menunjukkan bahwa suhu permukaan laut yang hangat

akan menyebabkan lingkungan menjadi tidak stabil dengan kelembaban yang lebih tinggi di lapisan troposfer bawah. Hal ini dapat memicu intensitas kejadian siklon tropis menjadi tinggi. Proyeksi berdasarkan teori dan model dinamis menunjukkan bahwa gas rumah kaca dapat menyebabkan siklon tropis menjadi badai yang lebih kuat dengan peningkatan intensitas 2% hingga 11% pada tahun 2100 (Knutson dr., 2010). Penelitian lain dari Purnama dr. (2019) menyimpulkan bahwa perubahan iklim yang dikaitkan dengan fenomena El Nino dan La Nina yang terjadi antara tahun 2007 hingga 2017 berpengaruh signifikan terhadap intensitas dan masa hidup siklon tropis di sekitar wilayah Indonesia terutama wilayah utara ekuator, sedangkan di wilayah selatan ekuator tidak menunjukan adanya korelasi yang signifikan.

Meskipun kejadian siklon tropis yang dianalisis dalam penelitian ini terjadi di luar wilayah Indonesia, namun beberapa kasus siklon tropis yang terjadi secara tidak langsung juga berdampak terhadap wilayah Indonesia seperti mengakibatkan terjadi banjir bandang, angin puting beliung, dan cuaca ekstrim lainnya. Sebagai contoh, siklon tropis Cempaka dan Dahlia yang terjadi pada bulan November 2017 telah mengakibatkan terjadinya banjir, tanah longsor, dan angin puting beliung di beberapa daerah Indonesia seperti di wilayah Pacitan, Wonosobo, Yogyakarta, dan Purworejo (Fibriantika dan Alhaqq, 2018). Siklon tropis Kaitak yang terjadi pada periode 13-22 Desember 2017 di perairan Filipina, juga berdampak tidak langsung terhadap wilayah Indonesia terutama di wilayah Sulawesi bagian utara, Kalimantan bagian timur, Sumatra bagian selatan dan Pulau Jawa yang mengakibatkan terjadinya curah hujan dengan intensitas ringan hingga sedang (Sugianto dr., 2019).

Selanjutnya, Siklon tropis Seroja yang terdeteksi pada 2 April 2021 di wilayah selatan Indonesia telah menyebabkan terjadinya kerusakan yang cukup parah di wilayah Nusa Tenggara Timur (NTT) dan negara tetangga Timor Leste. Kedua wilayah tersebut diterjang banjir bandang yang

dahsyat yang mengakibatkan banyak korban jiwa dan mengakibatkan kerugian ekonomi yang cukup besar. Kepala Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Dwikorita Karnawati pada konferensi pers 6 April 2021 menyebutkan bahwa siklon tropis Seroja ini merupakan siklon tropis pertama yang masuk ke wilayah daratan Indonesia, sehingga mengakibatkan dampak kerusakan yang luar biasa (Maaruf, 2021). Siklon tropis Seroja tersebut juga menunjukkan adanya indikasi bahwa kejadian-kejadian siklon tropis lainnya pada masa yang akan datang sangat mungkin terjadi di wilayah Indonesia akibat pengaruh dari fenomena perubahan iklim yang terjadi. Sehingga penelitian ini dan penelitian-penelitian terkait siklon tropis lainnya sangat diperlukan dalam upaya mitigasi bencana siklon tropis di Indonesia.

Keterbatasan dari sebuah penelitian merupakan hal penting lainnya yang perlu disampaikan. Salah satu keterbatasan dari penelitian ini adalah tidak dipertimbangkannya faktor spasial yang berpotensi memengaruhi siklon tropis baik dari segi durasi waktu, jarak tempuh maupun kecepatannya. Sebagai contoh, siklon tropis yang terjadi di wilayah perairan berpotensi memiliki kecepatan yang lebih besar dari pada siklon tropis yang terjadi di wilayah daratan karena adanya hambatan seperti bangunan dan pepohonan yang menyebabkan penurunan kecepatan siklon tropis. Selain itu, informasi kuantitatif spasio-temporal mengenai perubahan iklim (misalnya dari aspek perubahan suhu udara permukaan) di area studi juga tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini. Hal ini dikarenakan penelitian ini berfokus pada durasi waktu siklus hidup siklon tropis saja. Penelitian selanjutnya direncanakan akan menggunakan data spasio-temporal sebagai salah satu faktor tambahan dalam menganalisis dampak perubahan iklim terhadap kejadian siklon tropis di kedua wilayah. Meskipun demikian, hasil penelitian ini dapat membantu memberikan gambaran mengenai pengaruh perubahan iklim terhadap siklus hidup kejadian siklon tropis terutama di wilayah Pasifik Utara dan Pasifik Selatan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, penelitian ini mengkonfirmasi bahwa perubahan iklim berpengaruh signifikan terhadap kejadian siklon tropis. Kejadian siklon tropis sesudah tahun 1950 berlangsung lebih lama jika dibandingkan dengan siklon tropis yang terjadi sebelum tahun 1950, baik di kedua yaitu wilayah Pasifik Selatan dan Utara (perbandingan 2) maupun di wilayah Pasifik Selatan saja (perbandingan 3). Siklon tropis yang terjadi sebelum tahun 1950 di kedua wilayah berpotensi 48,9% untuk berakhir lebih cepat (memiliki durasi siklus hidup yang lebih singkat) jika dibandingkan dengan siklon tropis yang terjadi sesudah tahun 1950. Lebih rinci, setelah tahun *baseline* (1950), siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan berpotensi berakhir lebih lama jika dibandingkan dengan siklon tropis yang terjadi sebelum tahun 1950 di wilayah yang sama. Selain itu, durasi waktu (siklus hidup) siklon tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Selatan juga dipengaruhi oleh kecepatannya. Temuan ini juga didukung oleh hasil pengujian *Log-rank test* terhadap kurva survival *Kaplan-Meier* pada keempat model perbandingan yang dianalisis.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kepada *National Institute of Informatics* (NII) atas akses data historis kejadian siklon tropis di Pasifik Selatan dan Utara.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, S. (2021). Perbandingan Nilai Hazard Kejadian Tsunami di Indonesia Berdasarkan Posisi Garis Khatulistiwa (Katalog Tsunami Indonesia 1802 - 2018). *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 12(1), 33–45. <https://doi.org/10.34126/JLBG.V12I1.303>
- Anwar, S. (2022). Earthquake behavior in Sumatra territory based on time and distance between consecutive large event. In *The 13th of Aceh International Workshop and Expo on Sustainable Tsunami Disaster Recovery*

- (*The 13th AIWEST-DR 2021*) (Vol. 340, p. 01010). Banda Aceh: EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202234001010>
- Anwar, S., Maulia, F., & Salwa, N. (2022). Perbandingan Perilaku Gempa Bumi Susulan Pidie Jaya (7 Desember 2016) dan Ambon (26 September 2019). *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 13(2), 106–121. <https://doi.org/10.34126/jlbg.v13i2.349>
- Camargo, S. J., Barnston, A. G., & Zebiak, S. E. (2005). A statistical assessment of tropical cyclone activity in atmospheric general circulation models. *Tellus A*, 57(4), 589–604. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0870.2005.00117.X>
- Collett, D. (1994). *Modelling Survival Data in Medical Research*. London: Chapman & Hall/Crc.
- Fibriantika, E., & Alhaqq, R. I. (2018). Profil Vertikal Atmosfer Selama Aktivitas Siklon Tropis Cempaka dan Dahlia. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 19(2), 49–58. <https://doi.org/10.31172/jmg.v19i2.589>
- Garner, A. J., Kopp, R. E., & Horton, B. P. (2021). Evolving Tropical Cyclone Tracks in the North Atlantic in a Warming Climate. *Earth's Future*, 9(12), e2021EF002326. <https://doi.org/10.1029/2021EF002326>
- Gori, A., Lin, N., Schenkel, B., & Chavas, D. (2023). North Atlantic Tropical Cyclone Size and Storm Surge Reconstructions From 1950-Present. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(5), e2022JD037312. <https://doi.org/10.1029/2022JD037312>
- Gou, S. (2010). *Survival Analysis*. New York: Oxford University Press, Inc.
- Herizal, H. (2020). Siklon Tropis “MANGGA” Tumbuh di Samudera Hindia Sebelah Barat Daya Bengkulu. Retrieved from <https://www.bmkg.go.id/berita/?p=siklon-tropis-mangga-tumbuh-di-samudera-hindia-sebelah-barat-daya-bengkulu&lang=ID&tag=siklon>
- Hoque, M. A. A., Phinn, S., & Roelfsema, C. (2017). A systematic review of tropical cyclone disaster management research using remote sensing and spatial analysis. *Journal of Ocean and Coastal Management*, 146(9), 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.07.001>
- Kang, N. Y., & Elsner, J. B. (2015). Trade-off between Intensity and Frequency of Global Tropical Cyclones. *Nature Climate Change*, 5(7), 661–664. <https://doi.org/10.1038/nclimate2646>
- Kleinbaum, D. G., & Klein, M. (2012). *Survival Analysis: A Self-Learning Text* (3rd ed.). New York: Springer Science Business Media, Inc.
- Knutson, T. R., McBride, J. L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., ... Sugi, M. (2010). Tropical Cyclones and Climate Change. *Nature Geoscience*, 3(3), 157–163. <https://doi.org/10.1038/ngeo779>
- Maaruf, E. (2021, April 6). Siklon Tropis Seroja, Kepala BMKG: Baru Pertama Kali Terjang Daratan Indonesia, Biasanya Hanya di Laut. *Okenews*. Retrieved from <https://nasional.okezone.com/read/2021/04/06/337/2390114/siklon-tropis-seroja-kepala-bmkg-baru-pertama-kali-terjang-daratan-indonesia-biasanya-hanya-di-laut>
- NASA. (2022, January 11). Climate Change: How Do We Know? Retrieved January 11, 2022, from <https://climate.nasa.gov/evidence/>
- NII. (2023, February 1). Digital Typhoon: Search by Date / Season. Retrieved May 3, 2023, from http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/search_date.html.en
- Purnama, D. R., Zulistyawan, K. A., Christian, B., & Okta Veanti, D. P. (2019). Dampak Terjadinya El Nino/La Nina terhadap Intensitas, Masa Hidup dan Frekuensi Siklon. *Jurnal Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika*, 5(2), 10–21. <https://doi.org/10.36754/jmkg.v5i2.54>
- Sugianto, P. A., Azka, M. A., Mahubessy, R., & Winarso, P. A. (2019). Kajian Kondisi Atmosfer di Wilayah Indonesia Saat Periode Aktifnya Badai Tropis Kai-Tak. In *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya)* (Vol. 3, p. 216). <https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v3i0.28550>

- Surinati, D., & Kusuma, D. A. (2018). Karakteristik dan Dampak Siklon Tropis yang Tumbuh di Sekitar Wilayah Indonesia. *Oseana*, 43(2), 1–12. <https://doi.org/10.14203/oseana.2018.Vol.43No.2.16>
- Suryantoro, A. (2009). Pemanasan Global dan Hubungannya dengan Siklon Tropis Observasi Radar Presipitasi Satelit TRMM. In *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA* (pp. 525–533).
- Syaifullah, M. D. (2015). Siklon Tropis, Karakteristik dan Pengaruhnya di Wilayah Indonesia Pada Tahun 2012. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 16(2), 61–71. <https://doi.org/10.29122/JSTMC.V16I2.1048>
- WMO. (2020). Tropical Cyclones. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/natural-hazards-and-disaster-risk-reduction/tropical-cyclones>
- Wu, L., Wang, R., & Feng, X. (2018). Dominant Role of the Ocean Mixed Layer Depth in the Increased Proportion of Intense Typhoons During 1980–2015. *Earth's Future*, 6(11), 1518–1527. <https://doi.org/10.1029/2018EF000973>
- Wu, X., Lu, Y., Zhou, S., Chen, L., & Xu, B. (2016). Impact of Climate Change on Human Infectious Diseases : Empirical Evidence and Human Adaptation. *Journal of Environment International*, 86, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.007>
- Yang, C., Xu, J., & Yin, J. (2021). Stochastic Simulation of Tropical Cyclones for Risk Assessment at One Go: A Multivariate Functional PCA Approach. *Earth and Space Science*, 8(8), e2021EA001748. <https://doi.org/10.1029/2021EA001748>
- Yonson, R., Noy, I., & Gaillard, J. C. (2018). The measurement of disaster risk: An example from tropical cyclones in the Philippines. *Review of Development Economics*, 22(2), 736–765. <https://doi.org/10.1111/RODE.12365>