JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER

p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

Analisis Spasial Dan Temporal Perubahan Luas Gletser Puncak Jaya Menggunakan Citra Sentinel-2 Untuk Prediksi Kepunahan Gletser

Muhammad Zaidan Nafis[1,*], Amira Khairunissa[2] , Muhammad Rizky Perdana[3], Eka Djunarsjah[4]

[1,3,4]Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Teknik Geodesi dan Geomatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
[2] Sekolah Bisnis dan Manajemen, Manajemen Sains, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia
Email: [1,*]zaidannafis646@gmail.com, [2]amira.khairunisa@gmail.com, rizky_perdana@outlook.com, lautaneka@gmail.com
(* Email Corresponding Author : zaidannafis646@gmail.com)
Semua penulis berkontribusi secara setara dalam penyusunan dan penulisan makalah ini.
Received: July, 2, 2025 | Revision: July, 3, 2025 | Accepted: July, 4, 2025

Abstrak

Perubahan iklim global menyebabkan penyusutan gletser tropis yang signifikan, menjadikan Puncak Jaya, gunung tertinggi di Oseania, sebagai indikator kritis. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan luas beberapa fragmen gletser yang berada di Puncak Jaya dari tahun 2017 hingga 2024 dan memprediksi kapan gletser tersebut akan habis. Analisis dilakukan menggunakan citra Sentinel-2 dan Normalized Difference Snow Index (NDSI), serta memproyeksikan waktu kepunahannya. Metodologi melibatkan akuisisi citra Sentinel-2 dengan minimal tutupan awan, perhitungan NDSI untuk delineasi luas gletser, dan prediksi menggunakan model regresi linier serta eksponensial. Hasil menunjukkan penyusutan luas gletser yang drastis dan konsisten, kehilangan sekitar 69.5% dari luas awalnya (47.67 hektar pada 2017 menjadi 14.51 hektar pada 2024). Gletser utara mengalami fragmentasi, sementara gletser selatan hampir menghilang. Penurunan pesat tercatat pada periode 2018-2019 (terkait El Niño) dan 2021-2022 (terkait La Niña yang kompleks). Prediksi regresi linier (skenario pesimis) menunjukkan kepunahan pada 22 April 2026. Sementara itu, regresi eksponensial (skenario optimis, luas <1 hektar) memprediksi kepunahan pada 6 Oktober 2044. Rentang waktu ini menggarisbawahi potensi tinggi hilangnya gletser Puncak Jaya dalam beberapa dekade mendatang, menekankan urgensi mitigasi perubahan iklim.

Kata Kunci: Gletser tropis, Puncak Jaya, NDSI, Regresi Linier, Regresi Eksponensial.

Abstract

Global climate change is causing significant shrinkage of tropical glaciers, making Puncak Jaya, the highest mountain in Oceania, a critical indicator. This research aims to analyze the changes in the area of several glacier fragments on Puncak Jaya from 2017 to 2024 and predict when these glaciers will disappear. The analysis was conducted using Sentinel-2 imagery and the Normalized Difference Snow Index (NDSI), and projecting their extinction time. The methodology involved acquiring Sentinel-2 imagery with minimal cloud cover, calculating NDSI for glacier delineation, and making predictions using linear and exponential regression models. The results show a drastic and consistent reduction in glacier area, losing approximately 69.5% of its initial area (47.67 hectares in 2017 to 14.51 hectares in 2024). The northern glacier experienced fragmentation, while the southern glacier has almost disappeared. Rapid declines were recorded in the 2018-2019 period (linked to El Niño) and 2021-2022 (linked to complex La Niña events). Linear regression prediction (pessimistic scenario) indicates extinction by April 22, 2026. Meanwhile, exponential regression (optimistic scenario, area <1 hectare) predicts extinction by October 6, 2044. This time frame underscores the high potential for the disappearance of Puncak Jaya Glacier in the coming decades, emphasizing the urgency of climate change mitigation.

Keywords*: Tropical Glacier, Jaya Peak, NDSI, Linear Regression, Exponential Regression.*

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim global merupakan salah satu tantangan lingkungan terbesar abad ke-21, dengan dampak signifikan pada sistem alam dan sosial. Salah satu manifestasi paling nyata adalah penyusutan gletser dan lapisan es di seluruh dunia. Gletser, sebagai cadangan air tawar terbesar, memegang peran krusial dalam menjaga keseimbangan hidrologi, mendukung ekosistem pegunungan, dan berkontribusi pada kenaikan permukaan laut [1]. Oleh karena itu, pemantauan dinamika gletser menjadi indikator vital untuk memahami laju dan dampak perubahan iklim global [1], [2]

Gletser tropis, seperti yang ada di Puncak Jaya, memiliki karakteristik unik dan kerentanan tinggi akibat lokasinya di wilayah khatulistiwa dengan suhu yang relatif hangat. Kondisi ini menjadikan gletser tropis sangat responsif terhadap fluktuasi suhu dan pola curah hujan, sehingga berfungsi sebagai indikator awal perubahan iklim. Dalam beberapa dekade terakhir, gletser Puncak Jaya telah menunjukkan penyusutan drastis, mengindikasikan laju pencairan yang terus meningkat dan menempatkannya di ambang kepunahan. Tanpa pemantauan berkelanjutan, Indonesia berisiko kehilangan aset alam unik dan indikator penting perubahan iklim regional ini.

Sejumlah penelitian telah memantau perubahan gletser menggunakan penginderaan jauh di berbagai wilayah. Studi mencakup analisis ekspansi danau akibat gletser leleh di Asia Tengah [3], pola penyusutan gletser yang heterogen di Dataran Tinggi Tibet [4], [5], serta perubahan gletser di Pegunungan Alpen [2] dan Islandia [3]. Di wilayah Himalaya dan sekitarnya, penelitian berfokus pada kehilangan area gletser dan faktor pengontrolnya [6], dinamika *surge* [7], serta

This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

pemantauan gletser maju [8], [9]. Selain itu, studi global dan regional terbaru melibatkan penilaian status gletser di Amerika Serikat bagian barat [10], perubahan gletser di Peru [11], pemantauan kecepatan permukaan gletser di situs warisan dunia [12], perubahan limpasan air lelehan gletser di Tianshan [13], dan rangkaian bahaya gletser katastropik di Himalaya Timur [14]

Dari tinjauan pustaka ini, mayoritas penelitian fokus di kawasan non-tropis atau pada fenomena gletser spesifik. Meskipun studi-studi ini memberikan landasan komprehensif, masih terdapat *gap analysis* dalam penelitian yang berfokus secara spesifik pada gletser tropis di Indonesia, khususnya Gletser Puncak Jaya. Belum ada studi komprehensif yang memproyeksikan kepunahan gletser ini berdasarkan tren penyusutan terkini menggunakan analisis spasial dan temporal terperinci dari citra Sentinel-2 yang lebih baru. Selain itu, kerentanan gletser tropis terhadap fluktuasi iklim seperti El Niño dan La Niña memerlukana.khairnis penyelidikan lebih lanjut.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

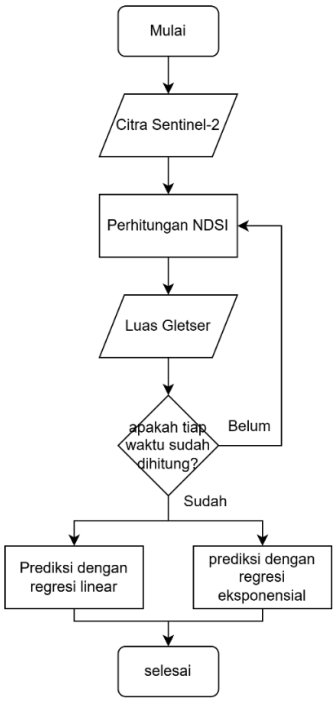
1.1 Menganalisis perubahan luas Gletser Puncak Jaya dari tahun 2019 hingga 2024 menggunakan citra Sentinel-2 dan Normalized Difference Snow Index (NDSI), dan

2.1 Memproyeksikan waktu kepunahan Gletser Puncak Jaya berdasarkan tren penyusutan yang teramati selama periode studi.

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman ilmiah dinamika gletser tropis di Indonesia dan dampaknya terhadap perubahan iklim. Hasilnya dapat menjadi dasar pengambilan keputusan kebijakan konservasi, strategi mitigasi dampak perubahan iklim, serta meningkatkan kesadaran publik akan pentingnya menjaga ekosistem pegunungan yang rentan ini.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Secara umum, penelitian ini berfokus pada pemantauan dinamika gletser di Puncak Jaya menggunakan citra satelit Sentinel-2. Metode utama yang diterapkan adalah perhitungan Normalized Difference Snow Index (NDSI) untuk mengidentifikasi dan mengukur luas tutupan gletser secara akurat dari tahun 2019 hingga 2024. Data luas gletser yang diperoleh kemudian akan dianalisis menggunakan dua model prediksi statistik, yaitu regresi linier dan regresi eksponensial, untuk memproyeksikan tren penyusutan dan memperkirakan kapan gletser Puncak Jaya akan sepenuhnya menghilang.



Gambar 1. Alur Pengerjaan Penelitian

Gambar 1 menunjukkan alur pengerjaan penelitian ini. Proses dimulai dengan akuisisi dan pra-pemrosesan citra Sentinel-2 untuk periode studi. Selanjutnya, dilakukan perhitungan Normalized Difference Snow Index (NDSI) untuk setiap citra yang telah dipilih. Dari hasil perhitungan NDSI, luas gletser kemudian diekstraksi untuk setiap waktu akuisisi. Tahap ini bersifat iteratif, di mana perhitungan NDSI dan ekstraksi luas gletser diulang untuk setiap citra tahunan hingga

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 380
This Journal is licensed under aCreative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

semua data waktu telah diproses. Setelah data luas gletser dari setiap tahun terkumpul, analisis dilanjutkan dengan dua pendekatan prediksi: regresi linier dan regresi eksponensial. Kedua metode ini akan digunakan untuk memproyeksikan tren penyusutan gletser dan memperkirakan waktu kepunahan gletser Puncak Jaya. Regresi liner digunakan untuk memprediksi kondisi worst-case penyusutan luas gletser, sedangkan regresi eksponensial digunakan untuk memprediksi skenario penyusutan luas gletser secara lebih alami. Proses penelitian diakhiri setelah kedua metode prediksi tersebut selesai diterapkan dan hasilnya dianalisis. Seluruh proses pengolahan citra dan analisis luas dilakukan dengan menggunakan software QGIS versi 3.34.11 dan Spreadsheet Excel 365.

2.1 Area Studi: Puncak Jaya, Papua Tengah

Pada penelitian ini, area studi yang difokuskan adalah Puncak Jaya, juga dikenal sebagai Piramida Jaya, adalah puncak tertinggi di Pegunungan Sudirman, Papua Tengah, Indonesia, dan merupakan gunung tertinggi di Oseania. Dengan ketinggian mencapai 4.884 meter di atas permukaan laut, Puncak Jaya termasuk dalam daftar "Seven Summits" dunia, yaitu puncak tertinggi di masing-masing tujuh benua.



Gambar 2. Puncak Jaya Tahun 1972 (Sumber: *United States Geological Survey*)

Yang membuat Puncak Jaya sangat unik dan relevan dengan penelitian sendiri merupakan akibat keberadaan gletser tropis di puncaknya. Gletser ini merupakan perbedaan karakteristik yang dapat dikatakan langka, dengan lokasinya yang berada di wilayah tropis dekat khatulistiwa tetapi terdapat gletser. Keberadaan gletser di Puncak Jaya menjadi indikator sensitif terhadap perubahan iklim global. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, gletser ini telah menunjukkan tanda-tanda penyusutan yang drastis akibat pemanasan global, menjadikannya objek studi krusial untuk memahami dampak perubahan iklim di wilayah tropis.

2.2 Data Citra Sentinel-2

Data citra satelit yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra Sentinel-2, yang merupakan bagian dari program Copernicus oleh European Space Agency (ESA) [15].Sentinel-2 terdiri dari dua satelit identik (Sentinel-2A dan Sentinel-2B) yang dirancang untuk akuisisi citra optik resolusi tinggi untuk pemantauan lahan. Keunggulan Sentinel-2 terletak pada kombinasi resolusi spasial yang tinggi (hingga 10 meter untuk band-band tertentu), cakupan spektral yang luas (13 band dalam spektrum tampak, inframerah dekat, dan inframerah gelombang pendek), serta frekuensi akuisisi yang tinggi (5 hari pada lintang menengah). Karakteristik ini menjadikannya sangat cocok untuk pemantauan perubahan tutupan salju dan es. Secara spesifik, penelitian ini akan memanfaatkan band Green (Band 3, 560 nm) dan Short-Wave Infrared (SWIR) (Band 11, 1610 nm) yang memiliki resolusi spasial 20 meter, karena band-band ini esensial dalam perhitungan Normalized Difference Snow Index (NDSI) untuk membedakan salju/es dari fitur permukaan lainnya. Citra akan diakses melalui platform Copernicus Dataspace untuk periode 2017-2024, dengan kriteria pemilihan citra yang meminimalkan tutupan awan untuk memastikan akurasi analisis. Berikut adalah tabel yang berisikan informasi citra satelit yang digunakan beserta waktu akuisisinya.

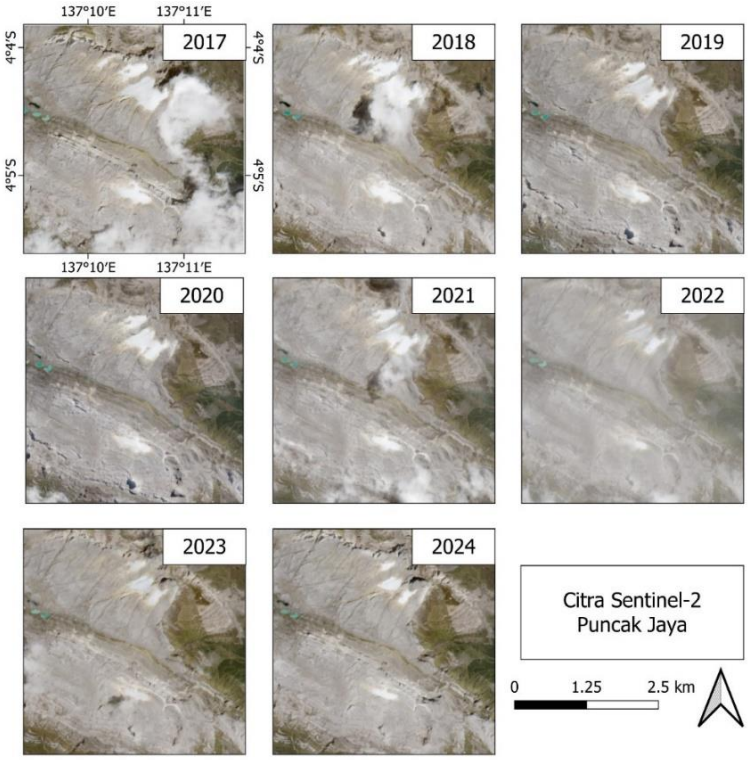
Tabel 1. Data Sentinel-2 yang Digunakan beserta Waktu Akuisisi

Tahun	Waktu Akuisisi	Platform
2017	5 Desember 2017 01:17:21 UTC	Sentinel 2A
2018	1 Oktober 2018 01:17:21 UTC	Sentinel 2A
2019	27 Agustus 2019 01:17:31 UTC	Sentinel 2A
2020	26 Agustus 2020 01:17:29 UTC	Sentinel 2B
2021	31 Agustus 2021 01:17:19 UTC	Sentinel 2B
2022	5 Oktober 2022 01:17:29 UTC	Sentinel 2B
2023	25 Oktober 2023 01:17:21 UTC	Sentinel 2A
2024	18 November 2024 01:17:21 UTC	Sentinel 2A

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 381
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

Tabel 1 menunjukkan waktu akuisisi citra Sentinel-2 yang digunakan dalam penelitian ini. Mengingat kondisi cuaca di wilayah Puncak Jaya yang sangat dinamis dan sering tertutup awan, pemilihan citra Sentinel-2 untuk setiap tahun dilakukan dengan prioritas utama pada tingkat tutupan awan terendah. Meskipun diupayakan untuk memilih citra dengan waktu akuisisi yang berdekatan atau pada bulan yang sama setiap tahunnya, kondisi lapangan yang tidak stabil menyebabkan fleksibilitas dalam pemilihan bulan akuisisi. Oleh karena itu, citra yang digunakan untuk analisis pada setiap tahun adalah citra terbaik yang memiliki tutupan awan minimal, terlepas dari perbedaan bulan akuisisinya, guna mendapatkan representasi tutupan gletser yang paling akurat.



Gambar 3. Citra Satelit Sentinel-2 dari Tahun 2017-2024 yang Digunakan untuk Menghitung Luas Gletser

Gambar 3 menyajikan citra Sentinel-2 Puncak Jaya untuk periode 2017 hingga 2024. Secara umum, citra-citra yang terpilih menunjukkan tingkat kejernihan yang tinggi dan relatif bebas dari tutupan awan di area gletser. Namun, terdapat beberapa pengecualian yang perlu dicatat. Pada citra tahun 2017, meskipun terdapat beberapa formasi awan, awan tersebut tidak menutupi area gletser utama, sehingga memungkinkan analisis tutupan es yang akurat. Sementara itu, citra tahun 2022 menunjukkan adanya kabut tipis yang sedikit mengurangi kejernihan visual. Meskipun demikian, batas-batas gletser masih dapat diidentifikasi dengan jelas, sehingga tidak mengganggu proses delineasi dan perhitungan luas gletser secara signifikan. Kondisi ini menegaskan tantangan dalam akuisisi citra di wilayah tropis yang tinggi dan mendukung pendekatan pemilihan citra berdasarkan minimalisasi tutupan awan di area studi.

2.3 Normalized Difference Snow Index

Salah satu metode kunci dalam penelitian ini adalah penggunaan Normalized Difference Snow Index (NDSI). NDSI merupakan indeks spektral yang dirancang khusus untuk mendeteksi dan memetakan tutupan salju dan es pada citra satelit. Prinsip dasar NDSI adalah memanfaatkan perbedaan karakteristik reflektansi spektral antara salju/es dengan fitur permukaan lainnya [16]. Salju dan es memiliki reflektansi yang sangat tinggi pada spektrum cahaya tampak, khususnya pada panjang gelombang hijau, namun menunjukkan absorpsi yang kuat dan reflektansi yang sangat rendah pada spektrum inframerah gelombang pendek (Short-Wave Infrared/SWIR). Kontras ini sangat efektif dalam membedakan salju/es dari awan yang cenderung memiliki reflektansi tinggi di kedua spektrum tersebut, serta dari air atau vegetasi.

$$NDSI = \frac{(Band\ Green - Band\ SWIR)}{(Band\ Green + Band\ SWIR)} \quad (1)$$

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 383
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

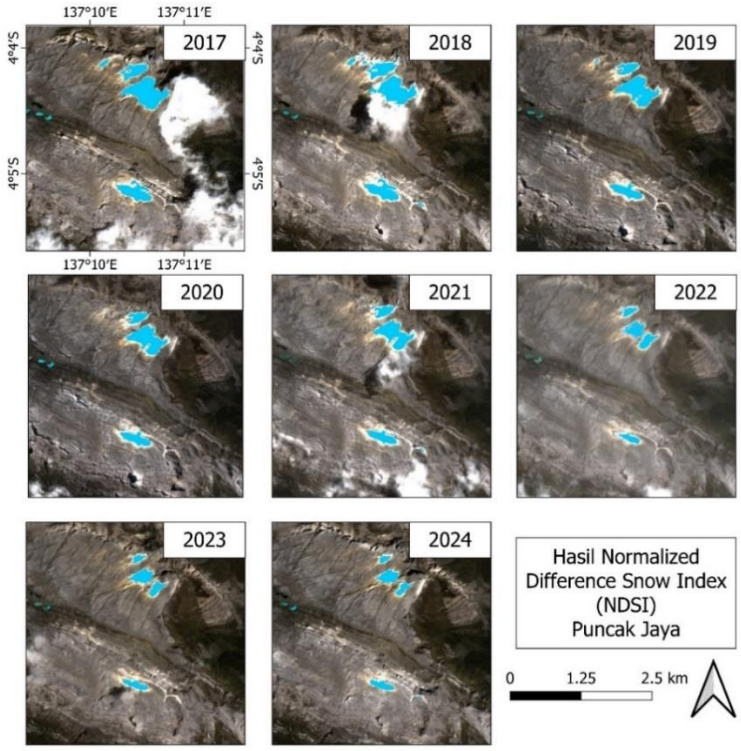
JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

Nilai NDSI yang dihasilkan berkisar antara -1.0 hingga +1.0. Secara umum, nilai NDSI positif yang tinggi (umumnya di atas 0.5) mengindikasikan keberadaan salju atau es, sementara nilai negatif atau mendekati nol menunjukkan fitur lain seperti air, vegetasi, atau lahan kosong. Dalam penelitian ini, ambang batas NDSI sebesar 0.5 digunakan untuk mengklasifikasikan piksel sebagai gletser, guna memastikan akurasi delineasi luas gletser dari tahun ke tahun.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian Hasil dan Pembahasan ini, akan disajikan secara komprehensif temuan-temuan penelitian yang dimulai dengan peta hasil perhitungan Normalized Difference Snow Index (NDSI) untuk setiap tahunnya, yang kemudian diikuti dengan penyajian tabel data luas gletser per tahun. Selanjutnya, bagian ini akan menampilkan hasil prediksi laju penyusutan gletser dan perkiraan waktu kepunahan yang diperoleh dari analisis regresi linier dan regresi eksponensial. Seluruh hasil tersebut akan dianalisis dan didiskusikan secara mendalam untuk mengidentifikasi tren, faktor-faktor pemicu, serta implikasi terhadap keberlanjutan gletser Puncak Jaya.

3.1 Hasil NDSI



Gambar 4. Hasil NDSI untuk Tiap Tahun (*warna biru menunjukkan area gletser*)

Gambar 4 menyajikan hasil perhitungan Normalized Difference Snow Index (NDSI) untuk Puncak Jaya dari tahun 2017 hingga 2024. Pada gambar tersebut, area berwarna biru menunjukkan wilayah gletser yang berhasil dideteksi dan diklasifikasikan menggunakan NDSI. Dari visualisasi spasial ini, dapat diamati dengan jelas bahwa area yang dikategorikan sebagai gletser mengalami penyusutan yang signifikan dari tahun ke tahun. Sebagai contoh, pada citra tahun 2017, gletser besar di bagian utara masih terlihat sebagai satu kesatuan yang utuh. Namun, seiring berjalannya waktu, terutama pada citra tahun 2022, gletser tersebut tampak terpisah menjadi beberapa fragmen yang lebih kecil, mengindikasikan penyusutan luas yang drastis.

Selain gletser di bagian utara, observasi mendalam pada Gambar 4 juga menunjukkan penyusutan yang sangat drastis pada gletser yang terletak di bagian selatan. Pada tahun 2017, gletser di selatan masih memiliki luasan yang cukup substansial dan terlihat jelas. Namun, dalam rentang waktu yang relatif singkat hingga tahun 2024, gletser di bagian selatan ini menunjukkan pengurangan luas yang paling signifikan, bahkan hampir menghilang atau tereduksi menjadi titik-titik es yang sangat kecil dan terisolasi. Fenomena ini tidak hanya menunjukkan penurunan kuantitas es secara keseluruhan, tetapi juga perubahan morfologi gletser yang mengarah pada hilangnya konektivitas antar bagian gletser, sebuah tanda kritis dari degradasi gletser yang parah. Pola fragmentasi dan pengurangan luas ini konsisten di seluruh periode studi, menegaskan tren pencairan gletser yang berkelanjutan di Puncak Jaya.

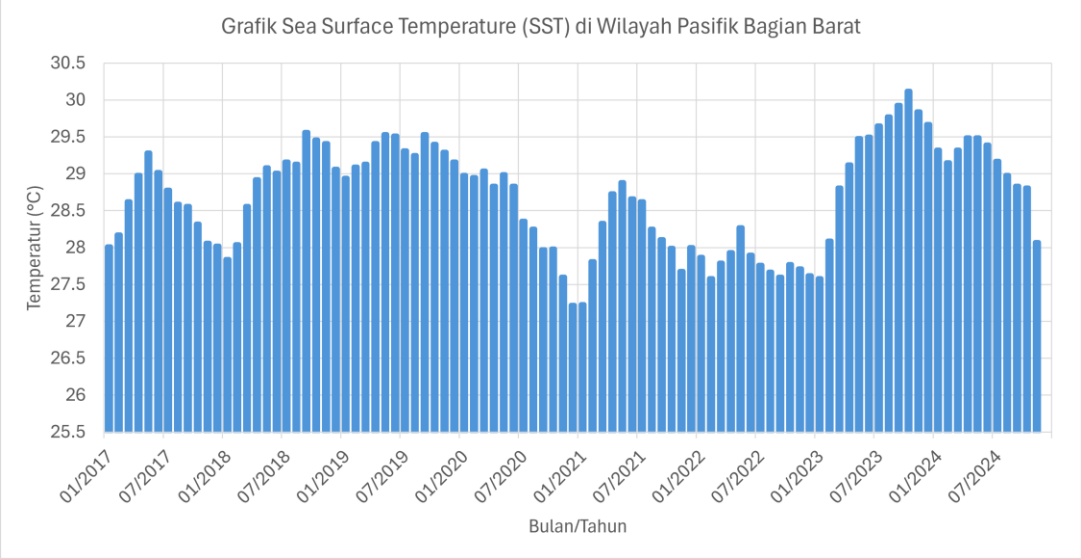
Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 384
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

Tabel 2. Luas Gletser tiap Tahun

Tahun	Luas (hektar)
2017	47.67
2018	43.52
2019	33.21
2020	32.51
2021	27.86
2022	16.89
2023	16.52
2024	14.51

Tabel 2 menyajikan data kuantitatif luas gletser Puncak Jaya dalam hektar dari tahun 2017 hingga 2024. Data ini secara numerik mengkonfirmasi tren penyusutan yang terlihat pada Gambar 4. Pada tahun 2017, luas gletser tercatat sebesar 47.67 hektar. Angka ini terus menunjukkan penurunan yang konsisten setiap tahunnya, mencapai 43.52 hektar pada tahun 2018, dan kemudian merosot tajam menjadi 33.21 hektar pada tahun 2019. Penurunan berlanjut pada tahun 2020 (32.51 hektar) dan 2021 (27.86 hektar). Laju penyusutan semakin signifikan pada tahun 2022, di mana luas gletser berkurang drastis menjadi 16.89 hektar, yang sejalan dengan observasi fragmentasi pada citra visual. Pada tahun 2023, luas gletser sedikit menurun menjadi 16.52 hektar, dan pada tahun terakhir studi, 2024, luasnya mencapai 14.51 hektar. Secara keseluruhan, dari tahun 2017 hingga 2024, Gletser Puncak Jaya telah kehilangan sekitar 69.5% dari luas awalnya, menunjukkan laju pencairan yang sangat pesat dalam jangka waktu yang relatif singkat.



Gambar 5. Grafik Sea Surface Temperature (SST) di wilayah Pasifik bagian barat. Suhu SST normal berada di angka 28˚C. Suhu diatas normal lebih dari 0.5˚C selama lebih dari 3 bulan dianggap sebagai *El Niño*, sedangkan kurang dianggap *La Niña*.

Gambar 5 menunjukkan grafik SST di wilayah Pasifik bagian barat dari tahun 2017 hingga tahun 2024 yang didapatkan dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [17]. Grafik tersebut menunjukkan periode terjadinya fenomena El Niño-Southern Oscillation (ENSO) yang berdampak di wilayah Indonesia khususnya bagian timur. Penurunan luas gletser yang sangat pesat, khususnya pada periode 2018-2019 dan 2021-2022, kemungkinan besar dipengaruhi oleh anomali iklim jangka pendek yang tumpang tindih dengan tren pemanasan global jangka panjang. Periode 2018-2019 diketahui bertepatan dengan kejadian El Niño lemah hingga moderat. Fenomena ENSO fase El Niño umumnya menyebabkan peningkatan suhu permukaan laut di Pasifik ekuator bagian tengah dan timur, yang berdampak pada perubahan pola cuaca global, termasuk di Indonesia. Di wilayah Indonesia bagian selatan dan timur, termasuk Papua, El Niño cenderung memicu kondisi yang lebih kering dan hangat, mengurangi curah hujan dan meningkatkan suhu udara. Kondisi ini secara langsung akan mempercepat ablasi (pencairan dan sublimasi) gletser karena berkurangnya akumulasi salju dan peningkatan suhu.

Sementara itu, periode 2021-2022 ditandai dengan keberadaan fenomena La Niña yang berkepanjangan. Meskipun La Niña umumnya diasosiasikan dengan peningkatan curah hujan di sebagian besar wilayah Indonesia, dampaknya terhadap gletser tropis di ketinggian ekstrem bisa lebih kompleks. Peningkatan curah hujan mungkin tidak selalu berarti peningkatan akumulasi salju jika suhu di puncak tetap berada di atas titik beku, menyebabkan curah hujan

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 385
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

turun sebagai hujan alih-alih salju. Selain itu, bahkan di tengah La Niña, anomali suhu lokal atau regional yang lebih hangat dari rata-rata, atau keterlambatan dalam onset musim basah yang membawa presipitasi dalam bentuk salju, dapat menyebabkan periode paparan es yang lebih lama dan peningkatan pencairan. Kondisi kabut tipis yang terlihat pada citra tahun 2022 juga dapat menjadi indikasi adanya kelembaban tinggi yang, jika disertai suhu di atas titik beku, justru dapat mempercepat pencairan gletser. Oleh karena itu, penurunan drastis pada kedua periode tersebut menggarisbawahi kerentanan gletser Puncak Jaya terhadap variabilitas iklim alami (seperti ENSO) yang diperparah oleh dampak pemanasan global.

3.2 Prediksi Menggunakan Regresi Linear

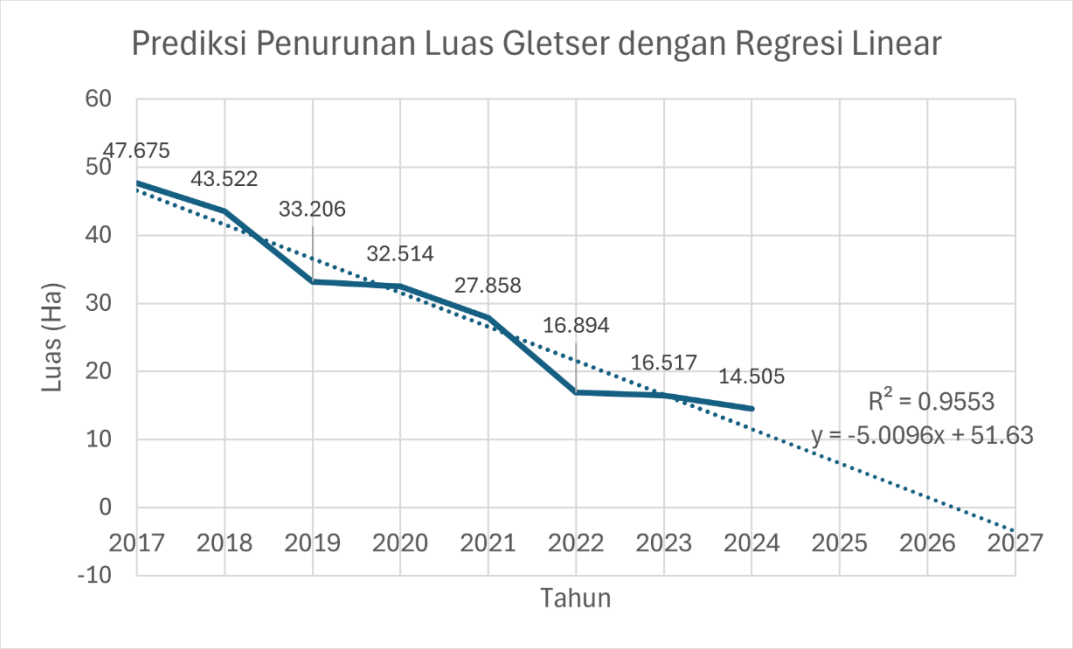
Regresi Linier adalah model statistik yang mengasumsikan hubungan linier antara variabel dependen dan variabel independen, dimana persamaan umumnya sebagai berikut:

$$y = bx + a \quad (2)$$

Pada persamaan 2, y adalah luas gletser, x adalah tahun, dan m adalah kemiringan (laju perubahan luas gletser per tahun). Model ini memproyeksikan laju penyusutan gletser secara konstan. Dalam konteks penelitian ini, regresi linier memberikan prediksi yang lebih pesimis (worst-case scenario). Hal ini karena jika laju pencairan gletser pada kenyataannya mengalami perlambatan akibat faktor alami seperti pemulihan gletser, model linier yang mengasumsikan laju konstan akan memprediksi gletser akan habis lebih cepat dari yang sebenarnya. Dari perhitungan regresi didapatkan persamaan dengan konstanta dan koefisien regresi sebagai berikut:

$$y = -5.009x + 51.63 \quad (3)$$

Dari proses regresi linear didapatkan nilai konstanta sebesar 51.64 dan koefisien regresi sebesar -5.009, menunjukkan laju penyusutan rata-rata gletser sebesar sekitar 5.01 hektar per tahun. dengan diketahuinya dua nilai ini maka dapat dilakukan prediksi kapan gletser di Puncak Jaya akan benar benar punah.



Gambar 6. Grafik Prediksi Luas Gletser dengan Menggunakan Regresi Linear

Dari Gambar 6, dapat diamati bahwa garis tren regresi linier memproyeksikan luas gletser akan mencapai nol (y=0) pada titik x=2026.306. Angka tahun desimal ini mengindikasikan bahwa gletser Puncak Jaya diprediksi akan habis pada tahun 2026. Untuk mengonversi tahun desimal 2026.306 menjadi tanggal spesifik, bagian desimal 0.306 dikalikan dengan jumlah hari dalam satu tahun non-kabisat (365 hari), menghasilkan sekitar 111.69 hari. Jika dibulatkan menjadi 112 hari, maka 112 hari setelah 1 Januari 2026 akan jatuh pada tanggal 22 April 2026. Prediksi ini menunjukkan bahwa gletser Puncak Jaya berada pada ambang kepunahan dalam waktu yang sangat dekat, dengan diprediksi akan benar benar hilang pada awal tahun 2026. Dari perhitungan regresi linear didapatkan juga nilai koefisien determinasi (R^2) untuk model ini adalah 0.9553. Nilai R^2 sebesar 0.9553 menunjukkan bahwa sekitar 95.53% variasi dalam luas gletser dapat dijelaskan oleh model regresi linier terhadap waktu. Ini mengindikasikan bahwa model linier memiliki kecocokan yang sangat kuat dengan data observasi dan secara efektif menangkap tren penyusutan gletser yang terjadi selama periode studi.

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 386
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

Dalam memprediksi waktu kepunahan gletser, penggunaan model regresi linier dapat dianggap sebagai skenario yang pesimis. Hal ini karena regresi linier mengasumsikan laju penyusutan gletser berlangsung secara konstan dari waktu ke waktu. Jika pada kenyataannya laju pencairan gletser mengalami perlambatan akibat pemanasan global yang berkurang karena usaha manusia, atau karena adanya faktor yang dapat memperlambat pencairan gletser yang tidak diketahui, maka model linier akan memproyeksikan gletser akan habis lebih cepat dari yang sebenarnya. Oleh karena itu, untuk mendapatkan gambaran yang lebih konservatif (optimis) dan mempertimbangkan kemungkinan laju pencairan yang melambat atau stabil di masa depan, penelitian ini juga melakukan prediksi menggunakan regresi eksponensial. Model regresi eksponensial mampu menangkap perubahan yang bersifat multiplikatif atau percepatan/perlambatan dalam data, sehingga dapat memberikan proyeksi yang mungkin lebih mendekati skenario terbaik jika tren penyusutan gletser tidak bersifat linier.

3.3 Prediksi Menggunakan Regresi Eksponensial

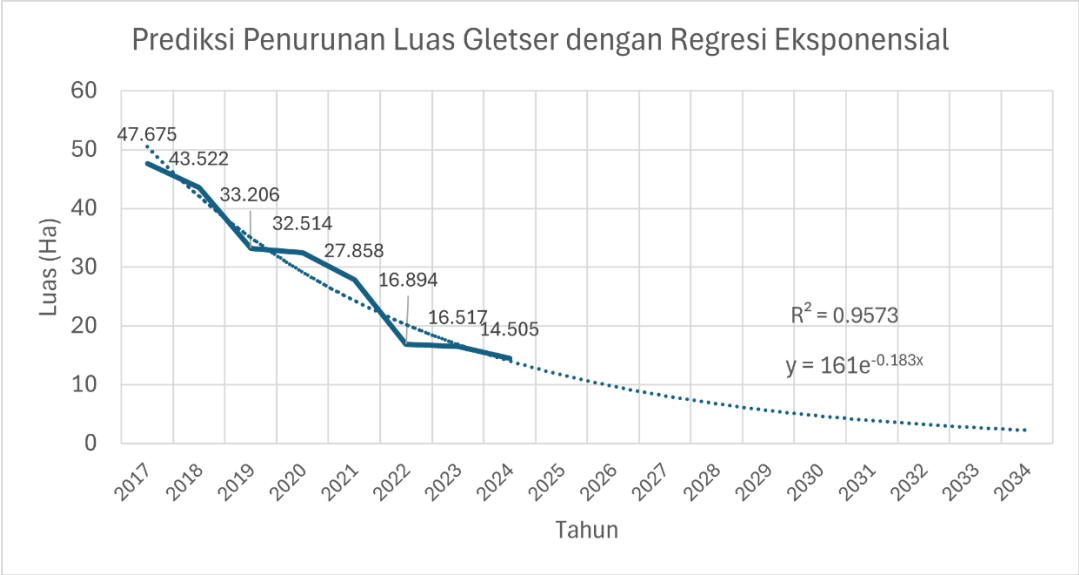
Regresi eksponensial adalah model statistik yang digunakan ketika hubungan antara variabel dependen dan independen bersifat non-linier, di mana perubahan variabel dependen terjadi secara proporsional terhadap nilai saat ini. Persamaan umum regresi eksponensial ditunjukkan sebagai berikut:

$$y = be^{ax} \quad (4)$$

Di mana y adalah variabel dependen, x adalah variabel independen, a adalah konstanta, e adalah basis logaritma natural, dan b adalah laju pertumbuhan atau peluruhan eksponensial. Dalam konteks gletser yang menyusut, nilai a akan negatif, menunjukkan peluruhan eksponensial. Model ini memungkinkan laju penyusutan gletser untuk berubah seiring waktu, bisa melambat atau bahkan dipercepat, tergantung pada data yang diamati. Dari perhitungan regresi eksponensial didapatkan persamaan dengan konstanta dan koefisien regresi sebagai berikut:

$$y = 161e^{-0.183x} \quad (3)$$

Dari proses regresi eksponensial didapatkan nilai konstanta a sebesar -0.183 dan konstanta b sebesar 161. dengan diketahuinya dua nilai ini maka dapat dilakukan prediksi kapan gletser di Puncak Jaya akan benar benar punah.



Gambar 7. Grafik Prediksi Luas Gletser dengan Menggunakan Regresi Eksponensial

Dari gambar 7, dapat dilihat nilai R^2 untuk model regresi eksponensial ini adalah 0.9573. Nilai R^2 sebesar 0.9573 menunjukkan bahwa sekitar 95.73% variasi dalam luas gletser dapat dijelaskan oleh model regresi eksponensial terhadap waktu. Ini mengindikasikan bahwa model eksponensial juga memiliki kecocokan yang sangat kuat dengan data observasi, bahkan sedikit lebih tinggi dibandingkan model linier, menunjukkan bahwa tren penurunan luas gletser mungkin lebih baik dijelaskan oleh fungsi eksponensial.

Dari Gambar 6 juga, terlihat bahwa kurva regresi eksponensial cenderung bersifat asimtotik terhadap sumbu X, yang secara matematis menyiratkan bahwa luas gletser (y) akan mendekati nol tetapi tidak pernah benar-benar mencapai nol. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai skenario yang lebih konservatif (optimis), karena model eksponensial memprediksi bahwa gletser akan bertahan lebih lama dibandingkan dengan model linier, atau bahkan tidak akan pernah habis sepenuhnya jika hanya berdasarkan tren eksponensial murni.

Meskipun secara matematis kurva eksponensial tidak pernah mencapai nol, dalam konteks fisik gletser, luas di bawah ambang batas tertentu dapat dianggap sebagai "habis" atau tidak lagi signifikan sebagai gletser. Oleh karena itu,

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 387
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa gletser akan dianggap habis apabila luasnya mencapai nilai di bawah 1 hektar. Berdasarkan persamaan regresi eksponensial, luas gletser akan berada di bawah 1 hektar ketika nilai x (tahun) mencapai 2044.767 dalam tahun desimal, atau dalam format penanggalan umum menunjukkan tanggal 6 Oktober 2044.

Dari hasil kedua model regresi, dapat disimpulkan bahwa terdapat rentang waktu yang signifikan untuk prediksi kepunahan gletser Puncak Jaya, tergantung pada skenario yang digunakan. Model regresi linier, yang mengasumsikan laju penyusutan konstan, memberikan prediksi yang lebih pesimis (*worst-case scenario*), yaitu gletser akan habis pada 22 April 2026. Sementara itu, model regresi eksponensial, yang mengasumsikan laju penyusutan yang melambat seiring waktu, memberikan prediksi yang lebih optimis (*best-case scenario*), yaitu gletser akan habis pada 6 Oktober 2044. Rentang waktu ini, dari tahun 2026 hingga 2044, menggarisbawahi ketidakpastian dalam proyeksi jangka panjang namun secara tegas menunjukkan bahwa keberadaan gletser di Puncak Jaya memiliki potensi besar dalam menghadapi kepunahannya dalam beberapa dekade mendatang, terlepas dari model yang digunakan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menganalisis perubahan luas Gletser Puncak Jaya dari tahun 2017 hingga 2024 menggunakan citra satelit Sentinel-2 dan Normalized Difference Snow Index (NDSI). Hasil analisis menunjukkan tren penyusutan luas gletser yang sangat signifikan dan konsisten selama periode studi. Secara spasial, gletser utama di bagian utara telah mengalami fragmentasi, sementara gletser di bagian selatan menunjukkan pengurangan luas yang sangat drastis, bahkan mendekati kehancuran total. Secara kuantitatif, Gletser Puncak Jaya telah kehilangan sekitar 69.5% dari luas awalnya dari tahun 2017 hingga 2024, dengan penurunan pesat yang terlihat pada periode 2018-2019 dan 2021-2022, yang kemungkinan terkait dengan anomali iklim seperti El Niño dan La Niña. Berdasarkan proyeksi menggunakan dua model regresi, diperoleh rentang waktu prediksi kepunahan gletser. Model regresi linier, yang merepresentasikan skenario paling pesimis dengan laju penyusutan konstan, memprediksi Gletser Puncak Jaya akan habis pada 22 April 2026. Di sisi lain, model regresi eksponensial, yang merupakan skenario yang lebih konservatif dan optimis dengan asumsi laju penyusutan yang melambat, memprediksi gletser akan habis (di bawah 1 hektar) pada 6 Oktober 2044. Rentang prediksi ini secara tegas menunjukkan bahwa keberadaan gletser di Puncak Jaya memiliki potensi besar dalam menghadapi kepunahannya dalam beberapa dekade mendatang. Temuan ini menggarisbawahi urgensi mitigasi perubahan iklim global dan pentingnya upaya konservasi untuk meminimalkan dampak lebih lanjut terhadap ekosistem unik ini. Penelitian ini terbatas pada data citra tahunan Sentinel-2 dengan resolusi spasial dan temporal tertentu. Analisis lebih lanjut dengan data resolusi harian atau integrasi suhu permukaan dapat meningkatkan akurasi prediksi. Studi selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model prediksi berbasis machine learning serta menggabungkan data iklim mikro lokal.

REFERENCES

[1] C. Gardner, “The Impact of Climate Change on Glacier Retreat.” [Online]. Available: www.carijournals.org40

[2] A. Krtalić, A. K. Divjak, and K. Z. Šteković, “Remote Sensing-Based Temporal Analysis of Aletsch Glacier Retreat (1990-2020),” in *International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, GISTAM - Proceedings*, Science and Technology Publications, Lda, 2025, pp. 253–263. doi: 10.5220/0013481100003935.

[3] S. Hauser and A. Schmitt, “Glacier Retreat in Iceland Mapped from Space: Time Series Analysis of Geodata from 1941 to 2018,” *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, vol. 89, no. 3, pp. 273–291, Jun. 2021, doi: 10.1007/s41064-021-00139-y.

[4] F. Zhao, W. Gong, S. Bianchini, and Z. Yang, “Linking glacier retreat with climate change on the Tibetan Plateau through satellite remote sensing,” *Cryosphere*, vol. 18, no. 12, pp. 5595–5612, Dec. 2024, doi: 10.5194/tc-18-5595-2024.

[5] Y. Xiao *et al.*, “Glacier Retreating Analysis on the Southeastern Tibetan Plateau via Multisource Remote Sensing Data,” *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, vol. 16, pp. 2035–2049, 2023, doi: 10.1109/JSTARS.2023.3243771.

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 388
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

JURNAL KOMPUTER TEKNOLOGI INFORMASI SISTEM KOMPUTER
p-ISSN: 2962-3022 | e-ISSN: 2963-7104
Volume 4 No 2 September 2025
Hal: 379-389
http://ejurnal.lkpkaryaprima.id/index.php/juktisi
DOI: https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.429

[6] I. Rashid, U. Majeed, N. A. Najar, and I. A. Bhat, "Retreat of Machoi Glacier, Kashmir Himalaya between 1972 and 2019 using remote sensing methods and field observations," *Science of the Total Environment*, vol. 785, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147376.

[7] M. Imran and U. Ahmad, "Geospatially analysing the dynamics of the Khurdopin Glacier surge using multispectral and temporal remote sensing and ground observations," *Natural Hazards*, vol. 108, no. 1, pp. 847–866, Aug. 2021, doi: 10.1007/s11069-021-04708-7.

[8] S. Zhou, X. Yao, D. Zhang, Y. Zhang, S. Liu, and Y. Min, "Remote sensing monitoring of advancing and surging glaciers in the Tien Shan, 1990–2019," *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 10, May 2021, doi: 10.3390/rs13101973.

[9] H. Wytiahlowsky, C. R. Stokes, and D. J. A. Evans, "Remote sensing of glacier change (1965-2021) and identification of surge-type glaciers on Severnaya Zemlya, Russian High Arctic," *Journal of Glaciology*, vol. 69, no. 278, pp. 1764–1784, Dec. 2023, doi: 10.1017/jog.2023.60.

[10] B. Abubakari and S. Ambinakudige, "The Status of Glaciers in the Western United States Based on Sentinel-2A Images," *Remote Sens (Basel)*, vol. 16, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.3390/rs16234501.

[11] C. S. Carrión *et al.*, "Multi-Temporal Analysis of the Glacier Retreat Using Landsat Satellite Images in the Nevado of the Ampay National Sanctuary, Peru," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, vol. 10, no. 1, Mar. 2022, doi: 10.13044/j.sdewes.d8.0380.

[12] Q. Meng *et al.*, "Monitoring glacier terminus and surface velocity changes over different time scales using massive imagery analysis and offset tracking at the Hoh Xil World Heritage Site, Qinghai-Tibet Plateau," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 112, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.jag.2022.102913.

[13] A. Wufu *et al.*, "Changes in glacial meltwater runoff and its response to climate change in the tianshan region detected using unmanned aerial vehicles (Uavs) and satellite remote sensing," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/w13131753.

[14] Y. Li *et al.*, "Glacier Retreat in Eastern Himalaya Drives Catastrophic Glacier Hazard Chain," *Geophys Res Lett*, vol. 51, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.1029/2024GL108202.

[15] Copernicus Data Space Ecosystem, "Copernicus Data Space Ecosystem." Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: https://dataspace.copernicus.eu/zz

[16] S. , G. I. , N. J. , & D. M. Gascoin, "Estimating Fractional Snow Cover in Open Terrain from Sentinel-2 Using the Normalized Difference Snow Index," MDPI. Accessed: Jul. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2072-4292/12/18/2904

[17] NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI), "Monitoring ENSO: Sea Surface Temperature (SST) Anomalies," *National Oceanic and Atmospheric Administration*. [Online]. Available: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst. [Accessed: Jul. 3, 2025].

Copyright © 2025 **Author(s)**, Page 389
This Journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License