



PEMETAAN KEBAKARAN HUTAN DI TAMAN NASIONAL BROMO TENGER SEMERU MENGGUNAKAN INDEKS BAIS2 DAN NBR

Nur Afifah^{1*}, Ike Sari Astuti²

^{1,2}Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

*Email Koresponden: nur.afifah.1907226@students.um.ac.id

Diterima: 28-12-2024, Revisi: 25-01-2025, Disetujui: 31-01-2025

©2025 Universitas Hamzanwadi

Abstrak. Kebakaran hutan di Taman Nasional Bromo Tengger Semeru menimbulkan banyak dampak negatif. Diantaranya, banyak vegetasi yang mati, lahan menjadi gersang, dan dampak sosial ekonomi lainnya. Identifikasi area terbakar secara konvensional cukup sulit dan memakan banyak biaya untuk wilayah yang luas. Untuk itu, dilakukan penelitian dengan penginderaan jauh untuk memetakan area terdampak berdasarkan tingkat keparahan kebakaran di area TNBTS yang cukup luas. Penelitian ini menggunakan pendekatan multitemporal dengan membandingkan keakuratan dan efektivitas indeks kebakaran, yaitu NBR (*Normalized Burned Ratio*) dan BAIS2 (*Burned Area Index for Sentinel-2*). Tahap penelitian meliputi analisis citra sebelum dan sesudah kebakaran, kemudian dihitung selisih indeks dan indeks separabilitas dan dicari luasan tingkat keparahan kebakaran. Hasil menunjukkan bahwa Indeks BAIS2 lebih baik daripada NBR dalam mengidentifikasi kebakaran. Hal ini dilihat dari akurasi tertinggi pada kelas terbakar ringan indeks dBAIS2 sebesar 92,5%. Sedangkan, Indeks dNBR memiliki akurasi tertinggi 77,5% pada kelas yang sama. Hasil uji indeks separabilitas menunjukkan bahwa BAIS2 lebih baik dalam membedakan area terbakar dan tidak terbakar dibandingkan NBR. Indeks BAIS2 lebih baik dalam memetakan area terdampak kebakaran dengan luas total 5462,6 Ha sedangkan indeks NBR hanya merekam 3239,09 Ha.

Kata kunci: Kebakaran Hutan dan Lahan, BAIS2, NBR

Abstract. Forest fires in Bromo Tengger Semeru National Park have many negative impacts. Among them, many vegetations die, land becomes barren, and other socio-economic impacts. Identifying burnt areas conventionally is considered difficult and costly over large areas. For this reason, a study was conducted using remote sensing to map the affected areas based on the severity of the fires in the fairly large TNBTS area. This study uses a multitemporal approach by comparing the accuracy and effectiveness of the fire index, namely NBR (*Normalized Burned Ratio*) and BAIS2 (*Burned Area Index for Sentinel-2*). The research stage includes analyzing images before and after the fire, then calculating the difference in the index and the separability index and looking for the extent of the severity of the fire. The results show that the BAIS2 Index is better than NBR in identifying fires. This can be seen from the highest accuracy in the lightly burned class of the dBAIS2 index of 92.5%. Meanwhile, the dNBR Index has the highest accuracy of 77.5% in the same class. The results of the separability index test show that BAIS2 is better at distinguishing burned and unburned areas than NBR. The BAIS2 index is better at mapping fire-affected areas with a total area of 5462.6 Ha while the NBR index only records 3239.09 Ha.

Keywords: Land and forest fires, BAIS2, NBR

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan menimbulkan sejumlah dampak negatif yang signifikan, dan wilayah pegunungan dengan jenis vegetasi sabana rawan terjadi kebakaran selama perubahan iklim ini terjadi. Menurut Fernandez-Manso *et al.* (2016), kebakaran tidak hanya mengonsumsi vegetasi dan menghancurkan klorofil, tetapi juga menghilangkan kelembaban tanah serta menyisakan lapisan dasar. Kebakaran hutan dan lahan yang berulang kali menjadi ancaman serius bagi pembangunan berkelanjutan di Indonesia (Arrafi *et al.*, 2022), terutama ekosistem hutan. Lebih jauh, kebakaran hutan telah diidentifikasi sebagai faktor gangguan utama bagi ekosistem yang menyebabkan modifikasi dan

perubahan tutupan lahan (Thonicke et al., 2001). Akibatnya, pasca kebakaran lahan menjadi gersang dan kurang subur.

Kebakaran hutan juga menyerang Indonesia, terutama di wilayah pegunungan. Kejadian ini meningkat dari tahun 2022 ke tahun 2023. Perlu diketahui bahwa Provinsi Jawa Timur menempati urutan keenam dengan nilai luas kebakaran hutan dan lahan terbesar di Indonesia pada periode Januari-Agustus 2023 dengan luas area terbakar 18.780 Ha (katadata.co.id, 2023). Salah satu wilayah yang mengalami kebakaran hutan terparah di Jawa Timur adalah Taman Nasional Bromo Tengger Semeru. Titik api sebelumnya muncul di berbagai lokasi di bulan Agustus 2023 yang diperparah oleh kejadian menyebarnya flare foto pre-wedding dengan pada September 2023 di wilayah sabana. Hal ini membuat kebakaran semakin masif, melebar dan tak terkendali (bnpb.go.id, 2023). Akibatnya, Taman Nasional Bromo Tengger Semeru (TNBTS) ditutup total untuk sementara waktu hingga kebakaran reda dan kondisi stabil. Jika tidak segera ditangani, kebakaran akan menyebar ke seluruh wilayah, tidak hanya di area Gunung Bromo. Akibatnya, vegetasi akan mati, lahan menjadi kering dan ekosistem menjadi rusak. Terlebih, diperlukan waktu lagi bagi tanaman untuk tumbuh dan beregenerasi kembali. Selain itu, kerugian ekonomi tidak dapat dihindari. Hal ini karena penutupan TNBTS dan biaya pemadaman yang tinggi lebih dari 1,2 T (bnpb.go.id, 2023).

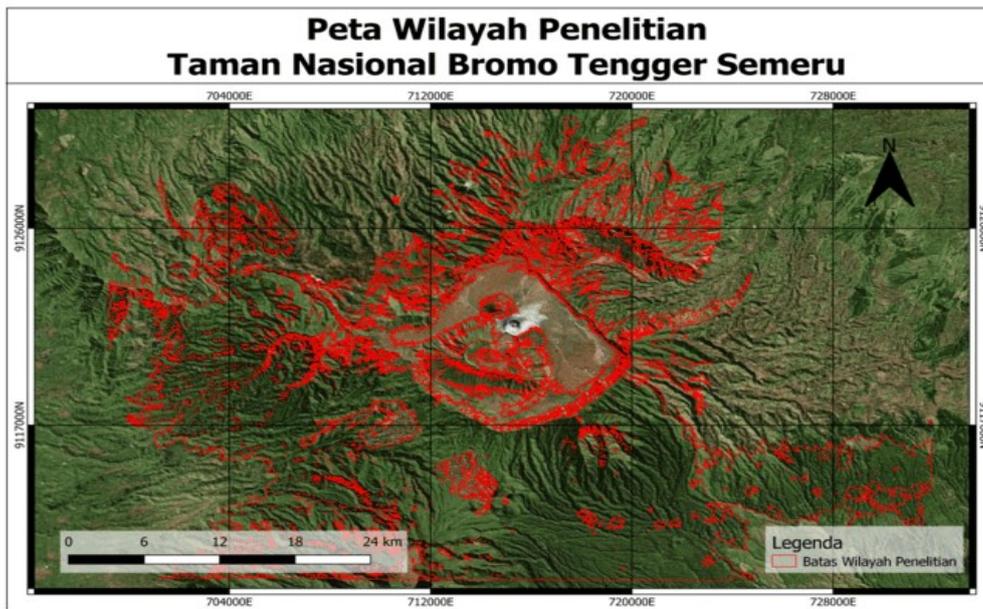
Penginderaan jauh telah terbukti akurasinya untuk mengestimasi wilayah yang terkena dampak kebakaran dan tingkat keparahan kebakaran (Chuvieco, 2009). Penelitian menggunakan penginderaan jauh dilakukan karena mudah, cepat, efisien dan minim biaya. Pemetaan pasca kebakaran umumnya disusun melalui spektrum citra satelit dengan menerapkan dua pendekatan berbeda, yaitu: menggunakan citra satelit tunggal dan menggunakan satelit multitemporal, yang biasanya melibatkan kombinasi akuisisi satelit sebelum dan setelah kebakaran (Filiponi, 2018). Sebelumnya, telah dilakukan penelitian tingkat keparahan kebakaran menggunakan kombinasi citra multitemporal (sebelum dan sesudah kebakaran) oleh Fernández-Manso *et. al.* (2016). Artinya, penggunaan citra multitemporal dalam analisis lebih baik daripada menggunakan citra tunggal.

Sejumlah penelitian lain juga telah dilakukan untuk mengidentifikasi area terbakar. Penelitian berbasis penginderaan jauh dilakukan oleh Boschetti *et al.* (2010) secara multitemporal dengan citra resolusi tinggi. Pada penelitiannya, Boschetti et al. (2010) mengemukakan bahwa pemetaan area terdampak kebakaran secara multitemporal lebih baik daripada menggunakan citra tunggal. Lebih jauh lagi, Chuvieco *et al.* (2002) menemukan indeks NBR untuk monitoring area terdampak kebakaran dan digunakan oleh Soverel *et. al.* (2010) untuk meneliti kebakaran berdasarkan nilai selisih citra sebelum dan sesudah kebakaran atau disebut *difference* dan mengembangkannya menjadi dNBR (*Normalized Burn Ratio difference*). Ketersediaan data resolusi spasial tinggi seperti Sentinel-2, memungkinkan eksplorasi lebih lanjut mengenai tingkat keparahan kebakaran. Selanjutnya, Filiponi (2018) mengenalkan indeks baru untuk memetakan area terbakar, yaitu BAIS2 (*Burned Area Index for Sentinel-2*) yang menggunakan spektral area tepi merah untuk mengidentifikasi area terbakar. Hal ini menurut Curran *et. al.* (1990) memenuhi saran tujuan penelitiannya dan dinilai sebagai indikator terbaik untuk menggambarkan kandungan klorofil serta metode ini sukses membedakan tingkat keparahan kebakaran yang mana oleh Fernández-Manso *et. al.* (2016) belum disempurnakan.

Untuk itu, dilakukan penelitian untuk memetakan area tingkat keparahan kebakaran dengan penginderaan jauh. Penelitian ini dilakukan dengan indeks NBR dan BAIS2 di Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dengan menggunakan pendekatan multitemporal. Hal ini dilakukan sebagai respon cepat tanggap sebagai antisipasi kejadian kebakaran berikutnya di wilayah TNBTS. Perlu diketahui, penelitian ini merupakan sebuah gambaran baru dalam bidang spasial dan penginderaan jauh secara global dimana ini adalah penelitian pertama yang mampu membandingkan indeks BAIS2 dan NBR dalam satu penelitian. Selain itu, penelitian ini menggabungkan beberapa metode akurasi, seperti indeks keterpisahan, nilai selisih (*difference*) dan bahkan membuat klasifikasi area tingkat keparahan kebakaran berdasarkan tutupan lahan dengan citra Sentinel-2. Dimana LAPAN (2015) hanya menggunakan citra Landsat-8 untuk analisis kebakaran dengan indeks NBR.

METODE PENELITIAN

Penelitian pemetaan kebakaran hutan di Taman Nasional Bromo Tengger Semeru ini menggunakan teknik penginderaan jauh dengan data validasi dari titik hotspot. Taman Nasional Bromo Tengger Semeru atau TNBTS secara administratif terletak di Kabupaten Malang (18.692,96 Ha), Kabupaten Pasuruan (4.642,52 Ha), Kabupaten Probolinggo (3.600,37 Ha), dan Kabupaten Lumajang (23.340,35 Ha) Provinsi Jawa Timur. Total luas kawasan tersebut sekitar 50.000 Ha. Secara geografis TNBTS terletak pada koordinat antara 7°54'-8°55'13" LS dan 112°51'-113°04" BT. Elevasi kawasan TNBTS berada antara 750 - 3676 mdpl dengan puncak tertingginya adalah Gunung Semeru. Wilayah penelitian dapat dilihat pada **Gambar 1** di bawah ini.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian
(Sumber: Rancangan Peneliti, 2023)

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra Sentinel-2 level 2A yang disesuaikan dengan data batas wilayah kerja Taman Nasional Bromo Tengger Semeru. Data sebelum kebakaran menggunakan akuisisi citra Sentinel bulan Juli 2023. Sedangkan, data setelah terjadi kebakaran menggunakan akuisisi dari citra Sentinel bulan September 2023. Tentunya, akuisisi data tersebut disesuaikan dengan frekuensi hotspot yang terjadi pada bulan September. Selain itu, pemrosesan dilakukan di Google Earth Engine sehingga mempermudah dan mempercepat pengolahan tanpa harus download data. Data Citra Sentinel-2 level 2A sudah terkoreksi geometrik maupun atmosferik (menggunakan algoritma Sen2cor). Artinya, citra tidak perlu dilakukan koreksi geometrik lagi dan nilai pixel yang terlihat sudah berupa nilai reflektan Base of Atmosferik (BOA) dan bukan nilai radian.

Penelitian ini terdiri dari tujuh tahapan, yaitu: 1) tahap studi literatur dan pengumpulan data; 2) tahap analisis *land cover*; 3) tahap indeks area terbakar; 4) tahap *difference index*; 5) tahap indeks separabilitas; 6) tahap *training sample* dan *thresholding*; 7) tahap penyusunan peta klasifikasi luas tingkat keparahan kebakaran. Adapun ke tujuh tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut:

Studi Literatur dan Pengumpulan Data

Studi literatur dilakukan untuk mengetahui efektifitas dan efisiensi penggunaan indeks NBR dan BAIS2 untuk analisis kebakaran. Selain itu, juga mencari referensi terkait penelitian terdahulu mengenai analisis kebakaran berbasis citra satelit dan penginderaan jauh. Sedangkan, data penelitian yang digunakan yaitu: 1) Citra Sentinel L-2A akuisisi bulan Juli 2023 (sebelum kebakaran) dan bulan September 2023 (setelah kebakaran) dari Google Earth Engine; 2) Batas wilayah Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dari Balai Besar Taman Nasional Bromo Tengger Semeru; 3) Shapefile vektor wilayah Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dari Open Street Map; 4) Titik Hotspot dari LAPAN BRIN dari link berikut: <https://hotspot.brin.go.id/>; 5)

Analisis Land Cover

Analisis land cover dilakukan untuk menyesuaikan area kajian dengan batas wilayah TNBTS. Hal ini berfungsi untuk mengetahui jenis land cover yang terdampak kabakaran hutan nantinya. Pembuatan klasifikasi land cover menggunakan algoritma Random Forest di Google Earth Engine. Land cover terbagi menjadi 4 yaitu, vegetasi rendah (pertanian, perkebunan, dan savana), vegetasi rapat (hutan), pasir Bromo, dan pemukiman. Setelah itu, dilakukan uji akurasi untuk mengetahui kinerja algoritma tersebut.

Indeks Area Terbakar

Tahap berikutnya, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai NBR dan BAIS2 untuk mengetahui nilai indeks area terbakar.

1) NBR (*Normalized Burned Ratio*)

Indeks NBR dikembangkan oleh Chuvieco *et al.* (2002) dan diperbarui oleh Chuvieco (2009). Indeks ini memiliki formula yang mirip dengan NDVI. Indeks NBR menggunakan Band 8 (*Near Infrared*) dan Band 12 (*Shortwave Infrared*).

$$NBR = \frac{NIR(Band\ 8) - SWIR(Band\ 12)}{NIR(Band\ 8) + SWIR(Band\ 12)} \dots\dots\dots(1)$$

2) BAIS 2 (*Burned Area Index for Sentinel-2*)

Indeks BAIS2 (*Burned Area Index for Sentinel-2*) diperkenalkan oleh Filipponi (2018). Indeks ini memanfaatkan band spektral tepi merah sebagai parameter utama dalam menentukan area terbakar, yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik vegetasi dan band spektral untuk merespon radiometric dari SWIR (*Shortwave Infrared*) yang dinilai memiliki rekognisi besar untuk mengidentifikasi area terbakar (Filipponi, 2018).

$$BAIS\ 2 = \left(1 - \sqrt{\frac{B6 \times B7 \times B8A}{B4}} \right) \times \left(\frac{B12 - B8A}{\sqrt{B12 + B8A}} + 1 \right) \dots\dots\dots(2)$$

Difference Index

Nilai delta (Δ) didapatkan dari selisih nilai citra setelah kebakaran dengan sebelum kebakaran. Berikut persamaan nilai dNBR(1) dan dBAIS2(2).

$$dNBR = NBR_{post} - NBR_{pre} \dots\dots\dots(3)$$

$$dBAIS\ 2 = BAIS\ 2_{post} - BAIS\ 2_{pre} \dots\dots\dots(4)$$

Indeks Separabilitas (Kaufman dan Remer, 1994)

Indeks separabilitas atau indeks keterpisahan bertujuan untuk mengetahui sensitivitas spektral dalam mengetahui area terbakar. Artinya, indeks ini digunakan untuk menilai seberapa baik keterpisahan antara kelas terbakar dan tidak terbakar. Nilai $\mu_{(b)}$ (μ_u) adalah nilai rata-rata dari sampel area terbakar / tidak terbakar. Sedangkan, Nilai $\sigma_{(b)}$ (σ_u) adalah sampel nilai deviasi standar dari sampel area terbakar / tidak terbakar. Indeks ini digunakan untuk melihat separabilitas pada citra NBRpost, BAIS2post, dNBR dan dBAIS2. Berikut persamaan Indeks Separabilitas:

$$SI = \frac{|\mu_b - \mu_u|}{(\sigma_b + \sigma_u)} \dots\dots\dots(5)$$

Training Sample dan Thresholding

Training sample berasosiasi dengan perhitungan indeks separabilitas dan juga nilai thresholding. Training sample diambil berdasarkan wilayah yang diperkirakan sebagai wilayah terbakar maupun tidak terbakar. Sedangkan, nilai thresholding biasanya didefinisikan sebagai μ , $\mu+2\sigma$, $\mu+1\sigma$, $\mu-1\sigma$ maupun $\mu-2\sigma$. Nilai μ merupakan nilai rata-rata sedangkan σ merupakan standar deviasinya. Thresholding berguna untuk klasifikasi sampel area terbakar dan tidak terbakar. Nilai thresholding dihitung pada citra setelah terbakar dan delta citra tersebut. Diharapkan, variasi thresholding yang digunakan bisa membuat beberapa skenario perkiraan luas lahan terbakar.

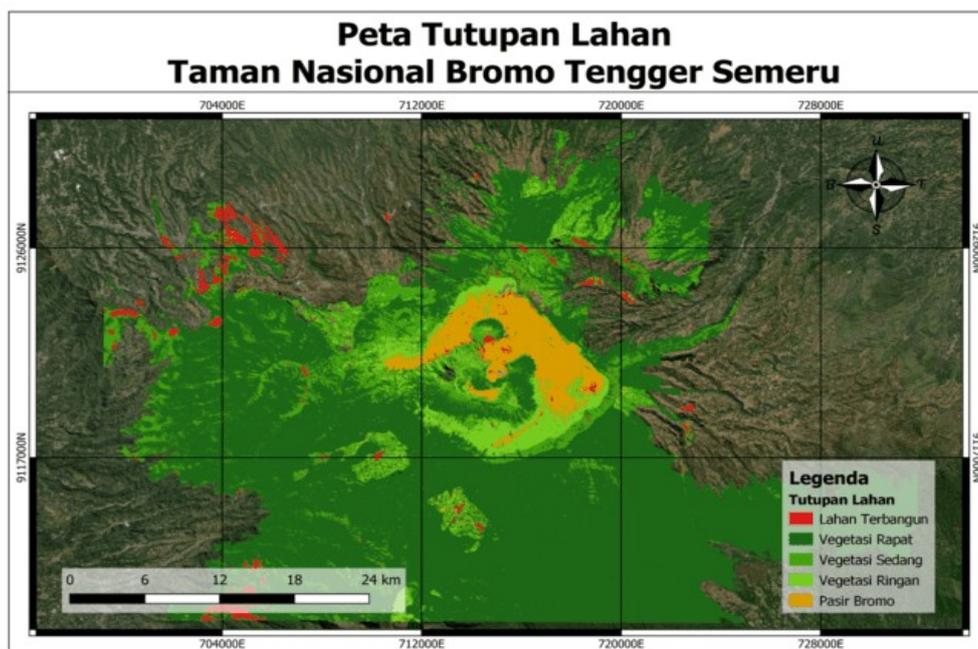
Peta Klasifikasi Luas Tingkat Keparahan Kebakaran

Klasifikasi luas tingkat keparahan kebakaran dilakukan berdasarkan thresholding dari difference indeks tersebut. Berdasarkan nilai Difference indeks, dilakukan pemisahan kelas terbakar dan tidak terbakar dengan variasi thresholding yang sudah dijelaskan sebelumnya di langkah 2.6. Langkah ini dilakukan untuk meneliti luas tingkat keparahan kebakaran dari indeks NBR dan BAIS2. Kemudian, dihitung luas tingkat keparahan kebakaran tersebut, setelah itu dihitung pula luas tutupan lahan terbakar. Selanjutnya, dibuat peta tingkat keparahan kebakaran nantinya akan dibuat berdasarkan variasi hasil klasifikasi area lahan terbakar yang ditentukan oleh nilai *thresholding*-nya.

TEMUAN DAN PEMBAHASAN

Tutupan Lahan

Tutupan lahan di Wilayah Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dibagi menjadi 5 kelas, yaitu lahan terbangun, vegetasi rapat, vegetasi sedang, vegetasi rendah dan pasir Bromo. Analisis tutupan lahan tersebut dilakukan menggunakan algoritma random forest di Google Earth Engine. Hasilnya, menunjukkan bahwa secara umum, kelas tutupan lahan dikategorikan sebagai vegetasi rapat, yang berupa tutupan lahan hutan, dan perkebunan. Kemudian didominasi oleh vegetasi sedang, dan vegetasi rendah (sabana dan pertanian), pasir Bromo dan lahan terbangun. Selengkapnya, dapat dilihat pada **Gambar 2** di bawah ini.



Gambar 2. Tutupan Lahan Kawasan Bromo Tengger Semeru
(Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023)

Kejadian kebakaran hutan di Taman Nasional Bromo Tengger Semeru terjadi di wilayah vegetasi rendah, vegetasi sedang, di sekeliling Gunung Bromo. Setelah dilakukan analisis klasifikasi tutupan lahan, dilakukan analisis uji akurasi metode *confusion matrix* untuk mengetahui kesesuaian antara data training dan data testing. Hasil uji akurasi dari metode *confusion matrix* dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Uji Akurasi Tutupan Lahan Kawasan Bromo Tengger Semeru

	Urban	V. Rapat	V. Sedang	V. Rendah	Pasir	Total	Producer Acc
Lahan Terbangun	22	0	0	0	0	22	1
Vegetasi Rapat	0	17	2	0	0	19	0,895
Vegetasi Sedang	0	0	10	0	0	10	1
Vegetasi Rendah	0	0	0	17	0	17	1

Pasir Bromo	0	0	0	0	14	14	1
Total	22	17	12	17	14	82	
Consumer Accuracy	1	1	0,83	1	1		

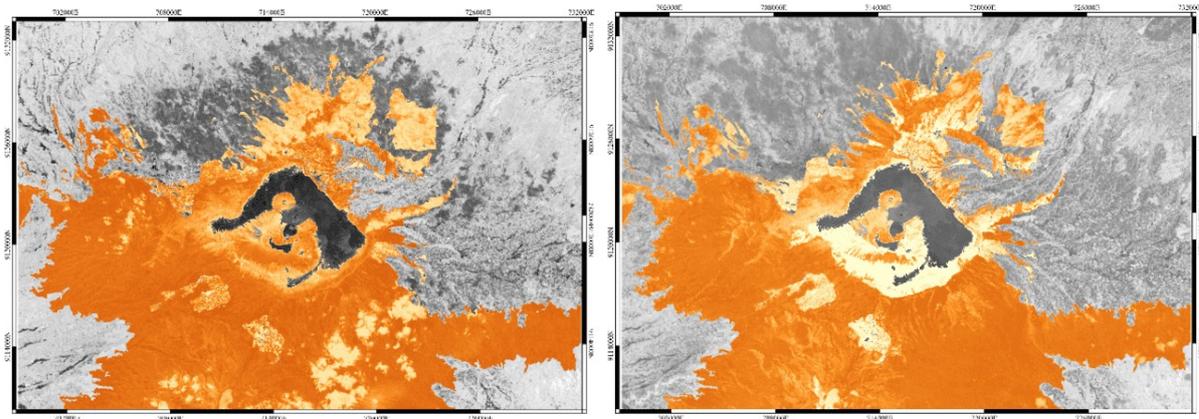
Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

Overall accuracy: 0,975 Kappa accuracy: 0,97.

Berdasarkan hasil uji akurasi land-cover kawasan Bromo Tengger Semeru, dapat dilihat bahwa Overall Accuracy mencapai nilai 0,975. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma random forest sangat baik untuk mengidentifikasi dengan benar seluruh kategori land-cover yang diuji. Nilai kappa accuracy 0,97 berarti distribusi sampel antarkelas sangat seimbang, dan hanya memiliki ketidakseimbangan sebesar 0,03. Nilai producer accuracy untuk kelas lahan terbangun, vegetasi sedang, vegetasi rendah dan Pasir Bromo bernilai 1. Artinya, model atau algoritma random forest memiliki kemampuan sangat baik dalam mengidentifikasi dan mengklasifikasikan secara benar sampel-sampel positif pada kelas-kelas land cover tersebut. Nilai consumer accuracy juga menunjukkan hasil yang sangat baik. Nilai consumer accuracy bernilai 1 untuk kelas lahan terbangun, vegetasi rapat, vegetasi rendah, dan pasir bromo. Artinya, model random forest memiliki kemampuan sangat baik dalam mengklasifikasikan secara benar sampel-sampel negatif dari kelas-kelas land cover tersebut.

1) Hasil Interpretasi Indeks NBR

Rentang nilai NBR berkisar antara -1 hingga 1. Nilai NBR yang rendah mendekati -1, berarti area atau objek tersebut merupakan lahan terbakar ataupun lahan terbuka. Sebaliknya, nilai NBR yang tinggi mendekati 1 menunjukkan lahan tersebut mempunyai vegetasi yang baik (Rachmawati, 2015 dalam Arrafi, dkk., 2022). Pada gambar 3.2 nilai NBR sebelum dan sesudah terjadi kebakaran terdapat perbedaan yang cukup kontras pada area savana selatan lingkaran bromo. Nilai NBR berwarna okra pada area terbakar (gambar 3.2 kanan) dan sangat kontras jika dibandingkan dengan area yang sama sebelum terbakar yang terlihat agak cokelat (gambar 3.2 kiri).



Gambar 3. NBR Pre (kiri) dan NBR Post (kanan)

(Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023)

Area yang diduga sebagai lahan terbakar diambil sebanyak 30 sampel yang menyebar di lingkaran Bromo pada citra NBR Post (kanan). Kemudian, dilakukan hal serupa pada sampel yang sama di citra NBR Pre (kiri). Hal ini dilakukan untuk mengetahui statistik nilai NBR sebelum dan setelah kebakaran. Berdasarkan tabel di bawah ini, diketahui nilai rata-rata NBR sebelum kebakaran yaitu 0,35. Hal ini mengindikasikan bahwa wilayah tersebut merupakan vegetasi rendah-sedang. Kemudian, setelah terjadi kebakaran turun menjadi -0,151. Artinya, wilayah tersebut yang semula vegetasi berubah menjadi wilayah terbakar (non-vegetasi). Standar deviasi pada citra sebelum terbakar (0,2) yang berarti variasi vegetasi di wilayah tersebut cukup beragam, sedangkan nilai standar deviasi setelah kebakaran lebih rendah (0,116) yang berarti wilayah tersebut cenderung memiliki karakteristik sama, yaitu hutan yang telah terbakar. Hal ini menunjukkan bahwa kebakaran telah menyebabkan kerusakan vegetasi di wilayah tersebut.

Tabel 2. Statistik NBR

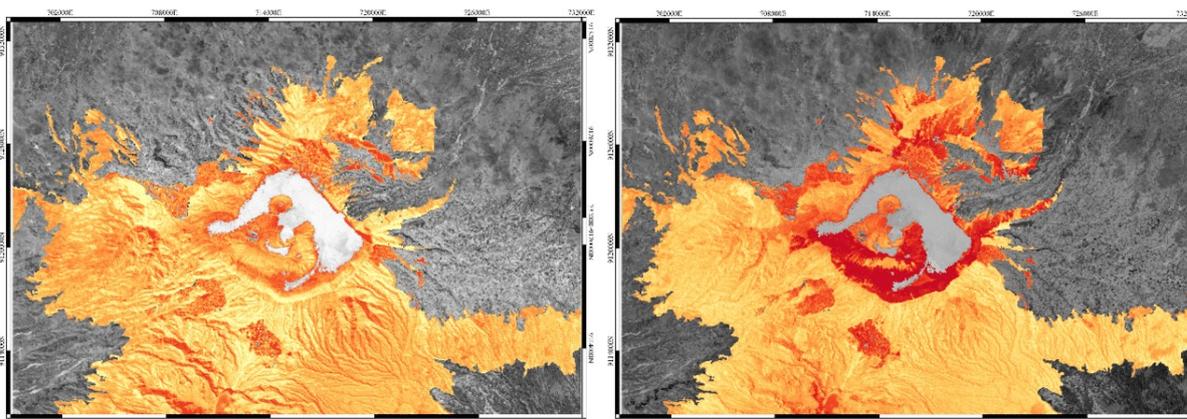
Burned Area	NBR Pre	NBR Post	Perubahan
-------------	---------	----------	-----------

Mean	0,35	-0,151	0,501
Standar Deviation	0,204	0,116	0,088

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

2) Hasil Interpretasi Indeks BAIS2

Rentang nilai BAIS2 untuk area bekas kebakaran berkisar antara -1 hingga 1. Jika nilainya mendekati -1, wilayah tersebut bukan wilayah terbakar. Sebaliknya, jika mendekati 1, wilayah tersebut merupakan wilayah bekas kebakaran. Jika nilainya lebih besar dari 1, maka wilayah tersebut merupakan daerah terbakar aktif (Filiponi, F., 2018 dan sentinel-hub.com). Pada gambar 3.3 Nilai BAIS2 terdapat perbedaan cukup kontras pada area lingkaran selatan Bromo. Pada citra BAIS2 sebelum kebakaran (kiri) semua warna terlihat okra-kuning cerah, namun setelah terjadi kebakaran, warna BAIS2 pada wilayah tersebut menjadi merah pekat (kanan). Hal ini menandakan wilayah tersebut diduga mengalami kebakaran.



Gambar 4. BAIS2 Pre (kiri) dan BAIS2 Post (kanan)
(Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023)

Sama seperti analisis sebelumnya, selanjutnya area yang diduga sebagai lahan terbakar diambil sebanyak 30 sampel yang menyebar di lingkaran Bromo pada citra BAIS2 Post (kanan). Kemudian, dilakukan hal serupa pada sampel yang sama di citra BAIS2 Pre (kiri). Hal ini dilakukan untuk mengetahui statistik nilai BAIS2 sebelum dan setelah kebakaran. Berdasarkan tabel di bawah ini, diketahui nilai rata-rata BAIS2 sebelum kebakaran yaitu 0,242. Hal ini mengindikasikan bahwa wilayah tersebut merupakan vegetasi rendah-sedang. Kemudian, setelah terjadi kebakaran naik menjadi 0,917. Artinya, wilayah tersebut berubah menjadi area bekas kebakaran (parah). Sedangkan, nilai BAIS2 ada yang lebih dari 1, dengan nilai maksimal 1,14 artinya terdapat kebakaran aktif ketika perekaman objek oleh citra Sentinel-2. Standar deviasi pada citra sebelum terbakar (0,23) yang berarti variasi vegetasi di wilayah tersebut cukup beragam, sedangkan nilai standar deviasi setelah kebakaran lebih rendah (0,114) yang berarti wilayah tersebut cenderung memiliki karakteristik sama, yaitu hutan yang telah terbakar. Hal ini menunjukkan bahwa kebakaran telah menyebabkan kerusakan vegetasi di wilayah tersebut.

Tabel 3. Statistik BAIS2

Burned Area	BAIS2 Pre	BAIS2 Post	Perubahan
Mean	0,242	0,917	0,675
Standar Deviation	0,23	0,114	0,116

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

3) Hasil Interpretasi Nilai Difference

Nilai selisih citra sesudah dan sebelum kebakaran (difference) didapatkan dengan mengurangi nilai spektral pada citra setelah kebakaran dengan sebelum kebakaran. Pendekatan menggunakan nilai difference telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, seperti Filiponi (2018) dan Rahmi

& Febrianti (2020). Menurut Filiponi (2018) penggunaan *difference index* (dBAIS2 dan dNBR) terbukti memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan pengamatan temporal tunggal karena indeks ini mengandalkan estimasi perubahan tutupan vegetasi. Pada citra dNBR, nilai rata-rata pada area terbakar -0,58. Artinya, nilai NBR sebelumnya yang cukup rendah (0,35) menurun karena kebakaran sehingga nilainya menjadi lebih rendah (-0,151). Sedangkan, nilai dBAIS2, memiliki nilai rata-rata area terbakar (0,647). Artinya, nilai rata-rata BAIS2 sebelum terjadi kebakaran (0,242) mengalami peningkatan menjadi 0,917 setelah terbakar. Statistik nilai difference selengkapnya dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Statistik Difference

Difference	Mean	Mean	Standar Deviasi	Standar Deviasi
	Burned	Unburned	Burned	Unburned
dNBR	-0,58	-0,057	0,130	0,045
dBAIS2	0,647	0,1022	0,198	0,166

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

4) Nilai Indeks Separabilitas

Nilai indeks separabilitas berfungsi untuk mengukur seberapa baik dua kelas dapat dipisahkan satu sama lain. Oleh karena itu, nilai yang lebih besar dari 1 berarti dapat memisahkan kedua kelas tersebut dengan baik, sebaliknya, jika nilainya kurang dari 1 menunjukkan daya diskriminasi yang buruk (Veraverbeke et al. 2011). Nilai indeks separabilitas pada kelas terbakar dan tidak terbakar dihitung pada citra NBR Post, dNBR, BAIS2 Post, dan dBAIS2. Secara keseluruhan, nilai indeks separabilitas semuanya berada di atas 1, artinya dapat membedakan kelas lahan terbakar dan tidak terbakar dengan baik. Pada tabel di bawah ini, indeks separabilitas BAIS2 Post adalah 3,67, sedangkan indeks separabilitas NBR Post adalah 2,11. Artinya, indeks BAIS2 lebih baik dalam membedakan area yang terbakar dan tidak terbakar dibandingkan dengan indeks NBR.

Tabel 5. Nilai Indeks Separabilitas

	NBR Post	dNBR	BAIS2 Post	dBAIS2
Separability Index	2,11	2,09	3,67	1,73

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

Indeks BAIS2 lebih baik dalam membedakan area yang terbakar dan tidak terbakar karena indeks BAIS2 lebih sensitif terhadap intensitas kebakaran. Indeks BAIS2 menggunakan rasio antara nilai pita red edge dan pita SWIR. Pita red edge sangat sensitif terhadap perubahan vegetasi, sedangkan pita SWIR sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Sedangkan, indeks NBR tidak terlalu sensitif karena masih dipengaruhi oleh kandungan air dalam vegetasi.

5) Thresholding dan Uji Akurasi

Nilai thresholding didapatkan dari penjumlahan atau pengurangan nilai rata-rata pada sampel area terbakar dengan standar deviasi sampel tersebut. Pembuatan thresholding berguna untuk mengklasifikasikan area terbakar pada citra dNBR dan dBAIS2. Pada citra dNBR, menggunakan ambang batas (threshold) μ (-0,58) untuk area terbakar ringan. Kemudian, untuk area terbakar sedang menggunakan threshold $\mu+1\sigma$ (-0,45). Terakhir, untuk area terbakar parah menggunakan threshold $\mu+2\sigma$ (-0,32). Jadi, nilai-nilai spektral citra yang lebih rendah dari threshold tersebut diklasifikasikan sebagai area terbakar. Pada citra dBAIS2, menggunakan ambang batas (threshold) μ (0,647) untuk area terbakar ringan. Kemudian, untuk area terbakar sedang menggunakan threshold $\mu-1\sigma$ (0,449). Terakhir, untuk area terbakar parah menggunakan threshold $\mu-2\sigma$ (0,251). Artinya, nilai-nilai spektral citra yang lebih tinggi dari threshold tersebut diklasifikasikan sebagai area terbakar. Selengkapnya lihat tabel di bawah ini:

Tabel 6. Nilai *Thresholding* dan Akurasi Citra dNBR dan dBAIS2

Tingkat Keparahan	dNBR	<i>Thresholding</i>	Akurasi	dBAIS2	<i>Thresholding</i>	Akurasi
-------------------	------	---------------------	---------	--------	---------------------	---------

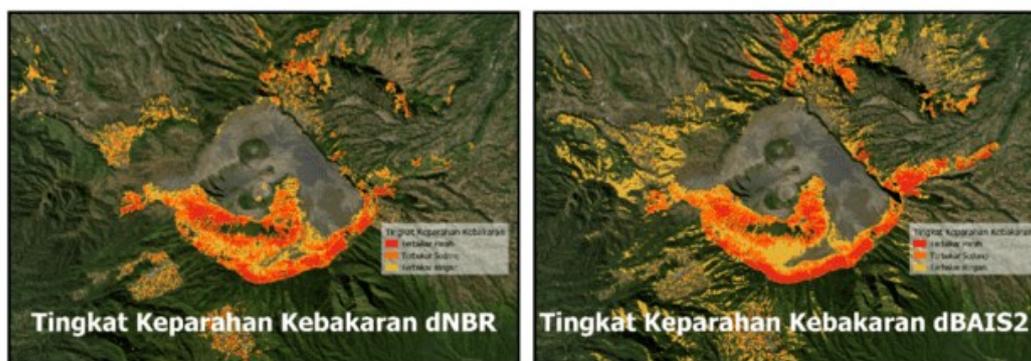
Kebakaran						
Terbakar Ringan	$\mu+2\sigma$	-0,58	77,5%	$\mu-2\sigma$	0,647	92,5%
Terbakar Sedang	$\mu+1\sigma$	-0,45	74,167%	$\mu-1\sigma$	0,449	80%
Terbakar Parah	μ	-0,32	68,33%	μ	0,251	70,83%

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

Akurasi klasifikasi thresholding area terbakar dan tidak terbakar dilakukan berdasarkan data hotspot dari LAPAN BRIN. Data tersebut berjumlah 60 titik hotspot dengan nilai confidence lebih dari 90% dari citra MODIS dan VIIRS. Akurasi didasarkan pada confusion matrix dengan menghitung overall accuracy yang memberikan nilai presentase total nilai true positif dan true negatif dibagi dengan jumlah data. Berdasarkan tabel di atas, secara keseluruhan indeks dBAIS2 memiliki akurasi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan indeks dNBR untuk memberikan klasifikasi area terbakar. Akurasi tingkat keparahan kebakaran ringan dengan threshold $\mu-2\sigma$ pada indeks dBAIS2 memiliki akurasi tertinggi, 92,5%. Disusul dengan threshold yang lebih sempit pada kelas terbakar sedang pada citra dBAIS2, dengan akurasi 80%. Hal ini berkaitan dengan sensitivitas citra dalam mengidentifikasi area terbakar. Indeks BAIS2 lebih cocok diimplementasikan untuk pemetaan kebakaran hutan dan lahan karena mampu mengklasifikasikan area terbakar secara benar dengan baik.

6) Luas Tingkat Keparahan Kebakaran

Peta luas tingkat keparahan kebakaran ditentukan oleh level thresholding dari indeks dNBR dan dBAIS2. Sebelumnya, Mallinis *et al.* (2018) dan Arrafi *et al.* (2022) menentukan tingkat keparahan kebakaran berdasarkan nilai thresholding dari indeks difference citra tersebut. Analisis tingkat keparahan kebakaran merupakan pengembangan lanjutan dari analisis difference citra sebelum dan sesudah kebakaran. Dengan melakukan analisis tingkat keparahan kebakaran, identifikasi level kebakaran pada area tersebut menjadi lebih detail dan mudah dipahami. Hal ini berbeda dengan sebelum citra dilakukan analisis keparahan kebakaran, hanya tampak signifikansi perubahan indeksnya saja. Area terbakar parah berwarna merah (lihat gambar di bawah ini), baik untuk citra dNBR dan dBAIS2. Area terbakar sedang berwarna orange dan area terbakar ringan berwarna kuning.



Gambar 5. Tingkat Keparahan Kebakaran dNBR (kiri) dan dBAIS2 (kanan)
(Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023)

Indeks dNBR secara visual memiliki perbedaan dalam menentukan wilayah terbakar dengan indeks dBAIS2. Indeks dNBR jika dilihat secara visual (lihat gambar di atas, kiri) mengklasifikasikan lahan terbangun sebagai area terbakar, sebaliknya indeks dBAIS2 (lihat gambar di atas, kanan) mengklasifikasikan vegetasi sebagai area terbakar. Hal ini karena Indeks dNBR memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan nilai NIR. Akibatnya, indeks dNBR mampu mendeteksi area terbakar, baik pada vegetasi maupun lahan terbangun. Namun, indeks dNBR belum mampu membedakan area terbakar vegetasi dengan lahan terbangun. Indeks dBAIS2 memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perbedaan nilai NIR pra-kebakaran dan pasca-kebakaran. Hal ini menyebabkan indeks dBAIS2 mampu membedakan area terbakar vegetasi dengan lahan terbangun. Namun, belum mampu membedakan area terbakar vegetasi dengan vegetasi tidak terbakar.

Tabel 7. Luas Tingkat Keparahan Kebakaran

Tingkat Keparahan Kebakaran	Luas (Ha) dNBR	Luas (Ha) dBAIS2
Terbakar Parah	548,6	740,98
Terbakar Sedang	1.083,61	1.261,9
Terbakar Ringan	1.606,88	3.459,72

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

Luasan area terbakar pada masing-masing kelas lebih tinggi pada indeks dBAIS2 daripada indeks dNBR. Perbedaan luasan paling rendah pada area terbakar parah dan paling tinggi pada area terbakar ringan. Luas area terbakar parah pada citra dNBR (548,6 Ha) sedangkan luas area terbakar parah pada citra dBAIS2 (740,98 Ha). Kemudian, luas area terbakar sedang pada citra dNBR (1.083,61 Ha) sedangkan luas area terbakar sedang pada citra dBAIS2 (1.261,9 Ha). Terakhir, luas area terbakar ringan pada citra dNBR (1.606,88 Ha) sedangkan luas area terbakar ringan pada citra dBAIS2 (3.459,72 Ha). Berdasarkan penjelasan tersebut, berkaitan dengan misklasifikasi dan juga kemampuan masing-masing indeks dalam mengkategorikan tutupan lahan sebagai lahan terbakar sehingga mendapatkan hasil yang berbeda-beda. Selengkapnnya, luas tingkat keparahan kebakaran dapat dilihat pada gambar grafik di bawah ini:



Gambar 6. Grafik Luas Tingkat Keparahan Kebakaran
(Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023)

7) Luas Tutupan Lahan Terbakar

Analisis luas tutupan lahan terbakar memberikan informasi kritis terkait intensitas dan distribusi kebakaran lahan di berbagai jenis tutupan lahan. Pada tabel di bawah ini memberikan gambaran rinci tentang seberapa besar wilayah tertentu yang telah terkena dampak kebakaran, dengan memperhatikan kelas tutupan lahan seperti lahan terbangun, vegetasi rapat, vegetasi sedang, vegetasi rendah, dan pasir Bromo. Analisis luas tutupan lahan terbakar sebelumnya dilakukan oleh Arrafi *et al.* (2022) menggunakan indeks NBR. Tentunya, sensitivitas masing-masing indeks mempengaruhi luasan lahan tiap-tiap kelas tutupan lahan tersebut.

Tabel 8. Luas Tutupan Lahan Terbakar

Tutupan Lahan	Luas (Ha) dNBR	Luas (Ha) dBAIS2
Lahan Terbangun	93,175	61,625
Vegetasi Rapat	1030,055	2925,691
Vegetasi Sedang	1259,268	1691,179
Vegetasi Rendah	812,646	767,863
Pasir Bromo	43,95	16,247

Sumber: Hasil pengolahan data penelitian, 2023.

Tabel di atas memberikan gambaran rinci mengenai luas lahan yang terbakar dalam beberapa kategori tutupan lahan, menggunakan dua indeks yakni dNBR (*Difference of Normalized Burn Ratio*) dan dBAIS2 (*Difference of Burned Area Index from Sentinel-2*). Lahan terbangun memiliki luas lahan terbakar sebesar 93,175 Ha dengan NBR, sedangkan BAIS2 mencatat 61,625 Ha. Untuk vegetasi rapat, luas lahan terbakar mencapai 1,030,055 Ha dengan NBR dan 2,925,691 Ha dengan BAIS2. Vegetasi sedang menunjukkan luas lahan terbakar sebesar 1,259,268 Ha dengan NBR dan 1,691,179 Ha dengan BAIS2. Sementara itu, vegetasi rendah memiliki luas lahan terbakar sekitar 812,646 Ha dengan NBR dan 767,863 Ha dengan BAIS2. Terakhir, pasir Bromo menunjukkan luas lahan terbakar sebesar 43,950 Ha dengan NBR dan 16,247 Ha dengan BAIS2.

Indeks dNBR cenderung mengklasifikasikan lahan terbangun dan tutupan lahan non vegetasi (Pasir Bromo) sebagai area terbakar, hal ini dilihat baik dari tabel di atas dimana indeks dNBR memetakan lahan terbangun dan Pasir bromo sebagai area terbakar lebih tinggi daripada indeks dBAIS2. Ini menunjukkan bahwa indeks NBR belum sepenuhnya dapat membedakan antara lahan terbangun dan vegetasi terbakar. Sementara, dBAIS2 lebih mampu membedakan area terbakar vegetasi dengan lahan terbangun. Di sisi lain, meskipun dBAIS2 dapat membedakan antara vegetasi terbakar dan lahan terbangun, masih ada kendala dalam membedakan antara vegetasi terbakar dan vegetasi tidak terbakar. Hal ini dilihat baik dari tabel bahwa vegetasi rapat dan sedang memiliki luas area terbakar lebih tinggi pada indeks dBAIS2 dan lebih rendah pada indeks dNBR.

SIMPULAN

Pemetaan kebakaran hutan di area Taman Nasional Bromo Tengger Semeru dengan indeks NBR dan BAIS2 berhasil memetakan area terbakar dengan baik. Tutupan lahan diklasifikasikan menjadi 5 kelas, lahan terbangun, vegetasi rapat, vegetasi sedang, vegetasi rendah dan pasir Bromo dengan akurasi keseluruhan 0,975. Analisis temporal citra sebelum dan sesudah kebakaran mampu memberikan perbedaan situasi area yang terbakar maupun tidak melalui citra maupun nilai indeks. Citra sesudah terbakar memiliki nilai indeks yang cenderung tinggi pada indeks BAIS2 (0,917) daripada citra sebelum terbakar (0,242), namun sebaliknya keadaan bertolak belakang pada indeks NBR dimana nilai sebelum terbakar (0,35) turun menjadi -0,151. Analisis nilai difference dari indeks tersebut mampu memberikan skema klasifikasi area terbakar berdasarkan threshold-threshold yang ditentukan. Nilai threshold yang sama dengan nilai rata-rata merupakan gambaran dari area terbakar parah, dan begitu pula sebaliknya. Uji separabilitas menunjukkan nilai separabilitas untuk BAIS2 mencapai 3,67, sedangkan untuk NBR hanya 2,11. Hal ini menunjukkan bahwa indeks BAIS2 lebih baik dalam membedakan area terbakar dan tidak terbakar daripada indeks NBR. Uji akurasi tingkat keparahan kebakaran menunjukkan bahwa indeks BAIS2 lebih baik dalam mengidentifikasi area terbakar dengan akurasi 92,5% pada kelas terbakar ringan daripada indeks NBR yang hanya menunjukkan akurasi 77,5% pada kelas yang sama. Tutupan lahan yang paling banyak terkena kebakaran berdasarkan perhitungan indeks NBR adalah vegetasi sedang, dengan luas area terbakar sebesar 1.259,268 hektar. Sementara itu, menurut perhitungan indeks BAIS2, tutupan lahan yang paling banyak terdampak kebakaran adalah vegetasi rapat, dengan luas area terbakar mencapai 2.925,691 hektar. Berdasarkan analisis lebih lanjut, dapat disimpulkan bahwa keduanya punya kelebihan dan kekurangan masing-masing. NBR kurang mampu membedakan area terbakar hutan yang bercampur dengan lahan terbangun, di sisi lain BAIS2 kurang mampu membedakan area terbakar vegetasi dan vegetasi tidak terbakar.

DAFTAR PUSTAKA

- Arrafi, M., Somantri, L., & Ridwana, R. (2022). Pemetaan Tingkat Keparahan Kebakaran Hutan dan Lahan Menggunakan Algoritma Normalized Burn Ratio (NBR) Pada Citra Landsat 8 di Kabupaten Muaro Jambi. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 3(1), 10-19.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2023). *Karhutla Terjadi di Bukit Teletubies Gunung Bromo Sebagian Kawasan Wisata Ditutup*. (online), <https://bnpb.go.id/berita/karhutla-terjadi-di-bukit-teletubies-gunung-bromo-sebagian-kawasan-wisata-ditutup>, diakses pada 17 Desember 2023.

- Boschetti, M., Stroppiana, D., & Brivio, P. A. (2010). Mapping burned areas in a Mediterranean environment using soft integration of spectral indices from high-resolution satellite images. *Earth Interactions*, 14(17), 1-20.
- Chuvieco, E. (2009). *Global impacts of fire*. In *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*; Chuvieco, E., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany; pp. 1–11.
- Chuvieco, E., Martin, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103-5110.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Gholz, H. L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree physiology*, 7(1-2-3-4), 33-48.
- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., & Quintano, C. (2016). SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 170-175.
- Filipponi, F. (2018). BAIS2: Burned area index for Sentinel-2. In *Proceedings* (Vol. 2, No. 7, p. 364). MDPI.
- Katadata. (2023). *Luas Kebakaran Hutan Indonesia Capai 267 Hektare Sampai Agustus 2023*. (online), (<https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/09/20/luas-kebakaran-hutan-indonesia-capai-267-ribu-hektare-sampai-agustus>), diakses pada 16 Desember 2023.
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I., & Chrysafi, I. (2018). Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience & Remote Sensing*, 55(1), 1-18.
- Pusfatja LAPAN. (2015). *Pedoman Pemanfaatan Data LANDSAT-8 untuk Deteksi Daerah Terbakar (Burned Area)*. Jakarta: Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh, LAPAN.
- Rahmi, K. I. N., & Febrianti, N. (2020). Pemanfaatan data sentinel-2 untuk analisis indeks area terbakar (burned area). *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 2(1), 1-6.
- Sentinel-hub. (2020). *BAIS2 Adapts the Traditional BAI for Active Fires*. (online), (<https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2-for-BAIS2>), diakses pada 9 Januari 2024.
- Soverel, N. O., Perrakis, D. D., & Coops, N. C. (2010). Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1896-1909.
- Thonicke, K., Venevsky, S., Sitch, S., & Cramer, W. (2001). The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model. *Global Ecology and Biogeography*, 10(6), 661-677.