

Evaluasi Sensitivitas Ambang dan Separabilitas Spektral Indeks dMIRBI untuk Pemetaan Area Terbakar di Savana Pegunungan Tropis

Andrie Ridzki Prasetyo^{1*}, Niechi Valentino¹, Rato Firdaus Silamon¹

¹Program Studi Kehutanan, Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Mataram 83125, Indonesia

*Email: andrieridzki@unram.ac.id

Received : 29 Mei 2026
Accepted : 20 Juni 2026
Available online : 24 Juni 2026

ABSTRACT

The Mid-Infrared Burn Index (MIRBI) was designed for savanna ecosystems, yet its threshold sensitivity and spectral separability in Indonesian tropical montane savannas remain poorly documented. This study evaluates MIRBI for the Bukit Anak Dara fire (Sembalun, East Lombok, 31 August – 2 September 2024) using Landsat 8 OLI–TIRS Level-2 SR data acquired on 29 August and 14 September 2024. The difference image dMIRBI was tested at nine thresholds (7,000–25,000) and evaluated against a 319.61 ha control polygon visually interpreted from Sentinel-2A imagery (13 September 2024) using recall, precision, F1, IoU, kappa, and overall accuracy. Spectral separability statistics, ROC analysis, automatic Otsu thresholding, and bootstrap confidence intervals supported the evaluation. The dMIRBI distributions of burned and unburned pixels are highly separable (JM = 1.759; M-statistic = 2.176; AUC = 0.9960). The empirical threshold dMIRBI $\geq 15,000$ yields 318.87 ha (0.74 ha or 0.2% from control) with F1 = 0.937 (95% CI [0.930; 0.942]), IoU = 0.881, kappa = 0.927, and OA = 98.4%. The Otsu threshold produced an estimated burned area of 281.61 ha, only 4.4 ha lower than the official estimate reported by BKPH Rinjani Timur. Only 52.2% of SiPongi+/FIRMS hotspots fall inside the control polygon, confirming the complementarity of hotspots and spectral indices.

Keywords: dMIRBI, Landsat, Otsu, Burned Area Mapping, Spectral Separability

ABSTRAK

Mid-Infrared Burn Index (MIRBI) dirancang untuk ekosistem savana, namun karakter sensitivitas ambang dan separabilitas spektralnya pada savana pegunungan tropis Indonesia masih jarang dilaporkan. Penelitian ini mengevaluasi MIRBI pada peristiwa kebakaran Bukit Anak Dara (Sembalun, Lombok Timur, 31 Agustus – 2 September 2024) menggunakan citra Landsat 8 OLI–TIRS Level-2 SR pra-kebakaran (Agustus 2024) dan pasca-kebakaran (September 2024). Citra selisih dMIRBI diuji pada sembilan ambang (7.000–25.000) dan dievaluasi terhadap poligon kontrol 319,61 Ha hasil interpretasi visual citra Sentinel-2A (13 September 2024) dengan *recall*, *precision*, *F1*, *IoU*, *kappa*, dan *overall accuracy*. Statistik separabilitas spektral, analisis ROC, ambang Otsu otomatis, dan interval kepercayaan *bootstrap* memperkuat evaluasi. Distribusi dMIRBI antara kelas terbakar dan tidak-terbakar sangat terpisah (JM = 1,759; M-statistic = 2,176; AUC = 0,9960). Ambang empiris dMIRBI ≥ 15.000 menghasilkan luas 318,87 Ha (selisih 0,74 Ha atau 0,2% dari kontrol) dengan F1 = 0,937 (95% CI [0,930; 0,942]), IoU = 0,881, kappa = 0,927, dan OA = 98,4%. Ambang Otsu menghasilkan luas 281,61 ha, atau 4,4 ha lebih kecil dibandingkan laporan resmi BKPH Rinjani Timur. Hanya 52,2% titik panas SiPongi+/FIRMS berada di dalam poligon kontrol, menegaskan komplementaritas titik panas dan indeks spektral.

Kata kunci: dMIRBI, Landsat, Otsu, Pemetaan Area Terbakar, Keterpisahan Spektral.

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan dan lahan adalah gangguan ekosistem yang berulang setiap musim kemarau di Indonesia. Pada provinsi Nusa Tenggara, peristiwa ini hampir selalu didominasi oleh kebakaran savana pegunungan dengan fuel rumput kering, topografi curam, dan musim kering panjang antara Juni hingga Oktober (Sutomo & van Etten, 2023). Karakter inilah yang membuat lereng-lereng kompleks Rinjani di pulau Lombok rawan terbakar setiap tahun. Kawasan Bukit Anak Dara, salah satu jalur pendakian populer di kaki Rinjani, telah beberapa kali mengalami kebakaran besar dalam dua dekade terakhir.

Untuk memetakan luas terbakar pada lokasi yang sulit diakses seperti lereng Anak Dara, penginderaan jauh adalah pilihan yang paling masuk akal. Sejumlah indeks spektral telah dikembangkan dengan kekuatan dan kelemahan masing-masing. Indeks spektral paling populer adalah *Normalized Burn Ratio* (NBR) (Key & Benson, 2006) dan *Burned Area Index* (BAI) (Chuvieco et al., 2002). *Mid-Infrared Burn Index* (MIRBI) dari Trigg dan Flasse (2001) dirancang khusus untuk ekosistem savana, sedangkan NBRT menambahkan band termal (Holden et al., 2005), NBRSWIR memakai dua band SWIR (Liu et al., 2020), dan BAIS2 dikembangkan untuk Sentinel-2 (Filippini, 2018). Pilihan indeks yang tepat sangat bergantung pada karakter ekosistem dan ketersediaan data.

Pada peristiwa kebakaran Bukit Anak Dara September 2024, kelompok penulis sebelumnya telah menerapkan pendekatan dBAI-Otsu dan melaporkan luas terdeteksi 273,2 Ha dengan κ 0,853 (Prasetyo et al., 2025). MIRBI yang dirancang khusus untuk ekosistem savana (Trigg & Flasse, 2001) merupakan kandidat yang menjanjikan untuk lingkungan serupa, sebagaimana ditunjukkan pada beragam ekosistem savana di dunia (Pacheco et al., 2023; Gospodinova et al., 2025). Akan tetapi, karakter sensitivitas ambang, separabilitas spektral, dan

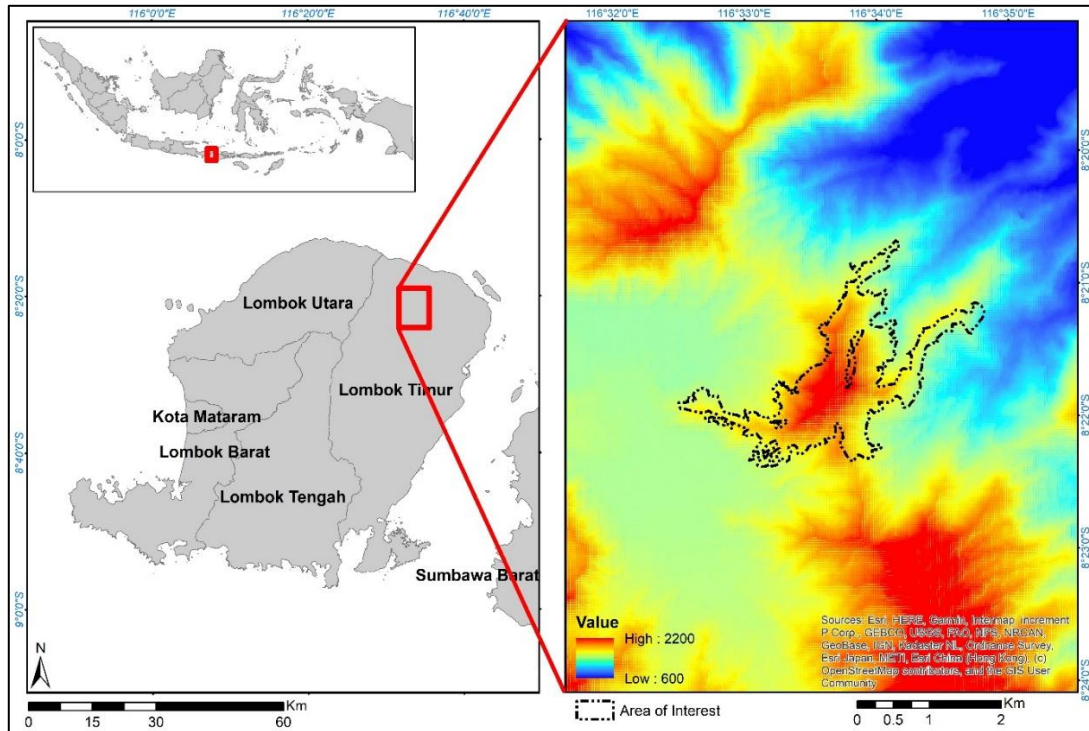
stabilitas hasil MIRBI pada savana pegunungan tropis Indonesia belum pernah dianalisis secara mendalam.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi sensitivitas sembilan ambang dMIRBI, pengujian separabilitas spektral berbasis JM-distance, M-statistic, dan AUC, serta validasi silang menggunakan poligon visual Sentinel-2A, ambang Otsu, hotspot SiPongi+/FIRMS, dan laporan resmi BKPH Rinjani Timur. Tujuan utamanya: (1) mengkarakterisasi perubahan MIRBI sebelum dan sesudah kebakaran; (2) mengukur separabilitas kelas terbakar vs tidak-terbakar; (3) mengevaluasi sensitivitas dMIRBI terhadap variasi ambang; dan (4) memvalidasi-silang estimasi luas dengan beberapa sumber terpercaya.

BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

Kawasan Bukit Anak Dara secara administratif berada di Desa Sembalun Lawang, Kecamatan Sembalun, Kabupaten Lombok Timur, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Koordinat lokasi berada antara 8°21'–8°23' Lintang Selatan dan 116°33'–116°34' Bujur Timur (Gambar 1). Ketinggian wilayah berkisar antara 1.000 hingga 2.200 m dpl dengan kelerengan yang umumnya melebihi 30%. Vegetasi didominasi savana pegunungan tropis berupa graminoid dan semak yang tersebar, dengan musim kemarau yang panjang antara Juni hingga Oktober. Kawasan ini berada di bawah pengelolaan Balai Kesatuan Pengelolaan Hutan Lindung (KPHL) Rinjani Timur dan menjadi salah satu jalur wisata pendakian populer. Pada akhir musim kering 2024, kebakaran besar mulai sekitar pukul 20.30 WITA pada 31 Agustus 2024 dan baru padam total pada 2 September 2024 sekitar pukul 24.00 WITA. Luas yang dilaporkan BKPH Rinjani Timur mencapai 286 hektare (Dinas LHK NTB, 2024).



Gambar 1. Lokasi penelitian Bukit Anak Dara.

Data Penginderaan Jauh dan Data Acuan

Semua data yang digunakan adalah data terbuka (*open-access*). Rinciannya disajikan pada Tabel 1. Dua *scene Landsat 8 OLI-TIRS Level-2 Science Products (L2SP) path/row 116/066* diunduh dari portal *USGS EarthExplorer*: pra-kebakaran tanggal 29 Agustus 2024 (LC08_L2SP_116066_20240829_20240905_0_2_T1) dan pasca-kebakaran tanggal 14 September 2024 (LC08_L2SP_116066_20240914_20240920_0_2_T1). Keduanya memiliki tutupan awan di bawah 10% pada *area of interest*. Produk L2SP sudah terkoreksi atmosfer oleh algoritma *Land Surface Reflectance Code (LaSRC)* sehingga tidak memerlukan koreksi tambahan.

Poligon kontrol untuk evaluasi akurasi diturunkan dari citra Sentinel-2A *Multispectral Instrument Level-2A* tanggal 13 September 2024 (S2A_MSIL2A_20240913T021531_N0511_R003_T50LMR_20240913T072047.SAFE) yang diunduh dari *Copernicus Data Space Ecosystem*. Poligon dideleniasi melalui interpretasi visual komposit *false-colour (SWIR2-NIR-Red)* pada skala kerja 1:5.000 oleh interpreter yang sudah familiar dengan lansekap setempat. Total luas poligon kontrol 319,61 hektare dalam ekstensi analisis 28.182 piksel valid (sekitar 2.536 hektare pada grid Landsat 30 m). Data pelengkap meliputi titik panas dari portal SiPongi+ KLHK dan NASA FIRMS (sensor MODIS resolusi sekitar 1 km dan VIIRS resolusi 375 m) (Schroeder et al., 2014), pada periode 30 Agustus hingga 4 September 2024.

Tabel 1. Data terbuka yang digunakan dalam penelitian.

Jenis data	Sumber	Resolusi	Peran
Landsat 8 OLI-TIRS, 29 Agustus 2024	USGS EarthExplorer p/r 116/066	30 m	MIRBI pra
Landsat 8 OLI-TIRS, 14 September 2024	USGS EarthExplorer p/r 116/066	30 m	MIRBI pasca
Sentinel-2A MSI L2A, 13 September 2024	Copernicus Data Space Ecosystem	10 m	Acuan visual
Titik panas, 30 Agustus – 4 September 2024	SiPongi+ KLHK; NASA FIRMS (VIIRS, MODIS)	375 m / 1 km	Validasi temporal
Laporan resmi luas	BKPH Rinjani Timur	Lapangan	Pembanding

Komputasi MIRBI dan dMIRBI

MIRBI didefinisikan oleh Trigg dan Flasse (2001) sebagai:

$$\text{MIRBI} = 10 \times \rho_{\text{SWIR2}} - 9,8 \times \rho_{\text{SWIR1}} + 2 \quad (1)$$

Pada Landsat 8 OLI, kanal yang digunakan adalah Band 6 untuk SWIR1 (1,57–1,65 μm) dan Band 7 untuk SWIR2 (2,11–2,29 μm). Citra selisihnya adalah:

$$\text{dMIRBI} = \text{MIRBI}_{\text{pasca}} - \text{MIRBI}_{\text{pra}} \quad (2)$$

Komputasi dilakukan piksel-per-piksel dengan masking nilai NoData ($-3,40 \times 10^{38}$). Karena reflektansi SWIR2 meningkat dan reflektansi SWIR1 menurun pada permukaan terbakar, nilai dMIRBI yang positif besar menjadi indikator piksel yang kemungkinan terbakar. Pengolahan dilakukan dengan QGIS 3.34. Komputasi indeks, thresholding Otsu, dan evaluasi akurasi di-script dalam Python 3.11 dengan pustaka GDAL, NumPy, scikit-image, dan scikit-learn.

Statistik Separabilitas Spektral

Sebelum menetapkan ambang, separabilitas statistik antara kelas terbakar dan tidak-terbakar pada distribusi dMIRBI dievaluasi dengan tiga pendekatan yang saling melengkapi dan bersifat threshold-independent. Pertama, jarak Bhattacharyya untuk distribusi normal univariat:

$$B = \frac{1}{4} \cdot [(\mu_1 - \mu_2)^2 / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)] + \frac{1}{2} \cdot \ln[(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / (2\sigma_1\sigma_2)] \quad (3)$$

Kedua, jarak Jeffries–Matusita:

$$JM = 2(1 - e^{-(B)}) \quad (4)$$

dengan rentang [0; 2] di mana nilai $\geq 1,9$ lazim dianggap sebagai pemisahan sangat baik. Ketiga, M-statistic dari Kaufman dan Remer (1994):

$$M = |\mu_1 - \mu_2| / (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (5)$$

dengan nilai $M > 1$ yang mengindikasikan kedua kelas dapat dipisah secara spektral. Sebagai pelengkap, kurva Receiver Operating Characteristic (ROC) dan Area Under Curve (AUC) dihitung pada subsampel 20.000 piksel acak (seed = 42).

Penentuan Ambang dan Evaluasi Akurasi

Penentuan ambang dilakukan dengan dua strategi yang saling melengkapi, mengikuti kerangka kerja yang sudah diterapkan oleh Prasetyo et al. (2025) pada lokasi yang sama. Pertama, ambang otomatis Otsu (Otsu, 1979) dihitung secara data-driven dari distribusi dMIRBI tanpa memerlukan informasi kelas.

Metode Otsu memaksimalkan varian antar-kelas dan minimasi varian intra-kelas, dan sudah lazim digunakan untuk pemetaan area terbakar (Liu et al., 2020; Achour et al., 2025). Kedua, sembilan ambang empiris antara 7.000 dan 25.000 diuji secara sistematis.

Untuk setiap ambang dibuat confusion matrix terhadap kontrol Sentinel-2A dengan empat besaran: true positive (TP), false positive (FP), false negative (FN), dan true negative (TN). Lima metrik akurasi dihitung mengikuti rekomendasi Olofsson et al. (2014):

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (6)$$

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (7)$$

$$\text{F1} = 2 \times \text{Precision} \times \text{Recall} / (\text{Precision} + \text{Recall}) \quad (8)$$

$$\text{IoU} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}) \quad (9)$$

$$\text{OA} = (\text{TP} + \text{TN}) / (\text{TP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{TN}) \quad (10)$$

$$\text{Kappa} = (\text{Pobs} - \text{Pexp}) / (1 - \text{Pexp}) \quad (11)$$

Kappa disertakan sebagai pelengkap F1, dengan catatan bahwa Foody (2020) telah mengkritik penggunaan kappa secara berlebihan pada pemetaan dengan kelas tidak seimbang. Karena itu F1 tetap menjadi metrik utama dalam studi ini. Stabilitas F1 pada ambang operasional dinilai melalui bootstrap dengan 1.000 resamples pada level piksel.

Validasi-silang Eksternal

Estimasi luas terbakar dari berbagai pendekatan dibandingkan dengan dua sumber otoritatif independen: (i) laporan resmi BKPH Rinjani Timur sebesar 286 hektare (Dinas LHK NTB, 2024), dan (ii) hasil dBAI–Otsu pada studi sebelumnya di lokasi yang sama sebesar 273,2 Ha (Prasetyo et al., 2025). Jika tiga pendekatan independen konvergen pada angka yang konsisten, keyakinan terhadap hasil meningkat (Olofsson et al. 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

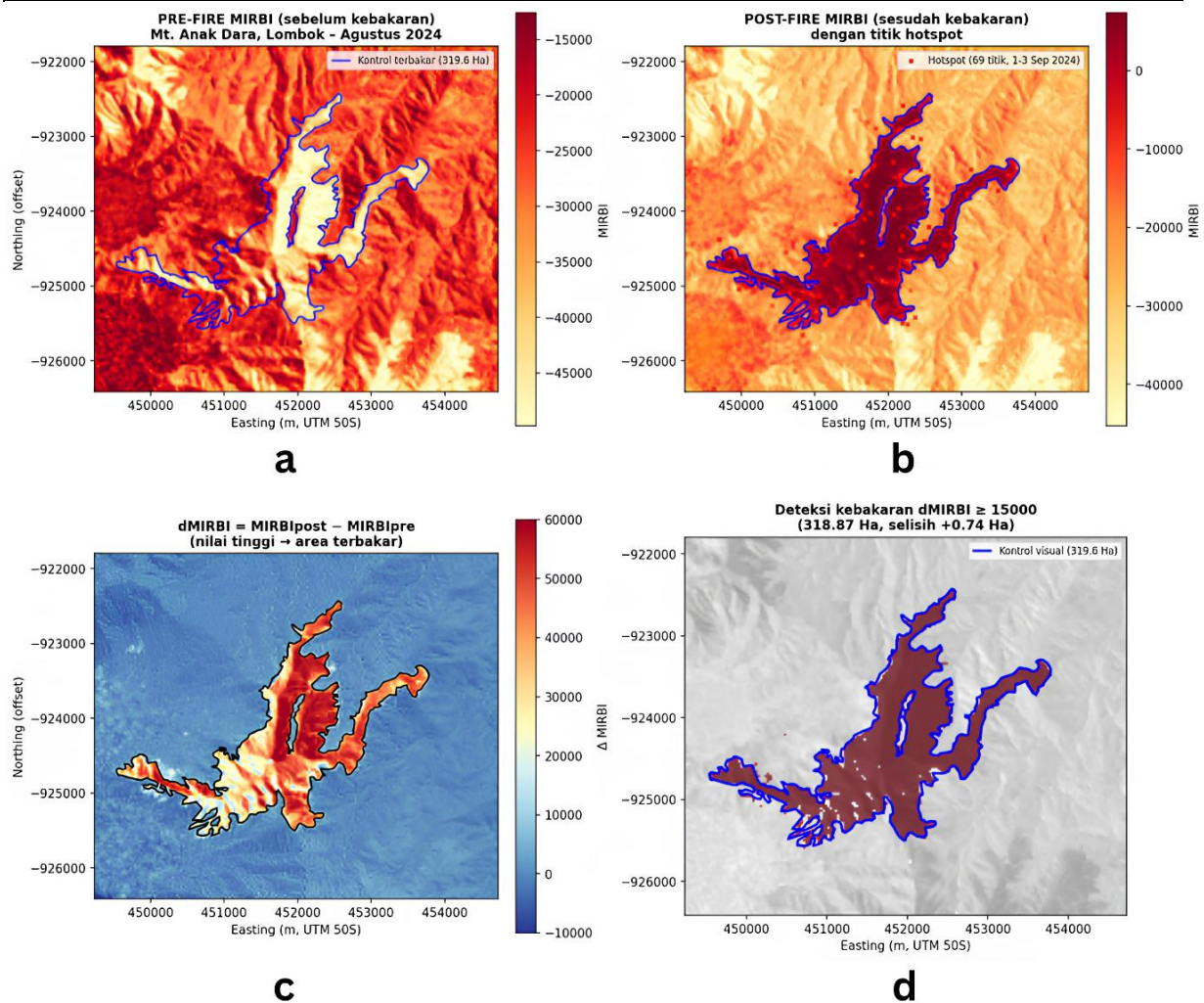
Hasil

Tabel 2 menyajikan statistik MIRBI untuk piksel di dalam dan di luar poligon kontrol. Sebelum kebakaran, median MIRBI di dalam poligon (−39.383) sudah lebih rendah dari di luar poligon (−25.691). Pola ini konsisten dengan kondisi rumput savana yang sudah mengering di lereng atas Anak Dara menjelang musim kebakaran. Setelah kebakaran, median MIRBI di dalam poligon melonjak ke +4.239, sedangkan di luar poligon hampir tidak berubah (−25.500). Perubahan rata-rata di dalam poligon

mencapai +39.639 unit, atau lebih dari 100 kali lipat perubahan rata-rata di luar poligon (+390).

Tabel 2. Statistik MIRBI di dalam vs di luar poligon kontrol, sebelum dan sesudah kebakaran.

Kelompok	n	Pra (median)	Pasca (median)	Δ (mean)
Dalam poligon	3.543	-39.383	+4.239	+39.639
Luar poligon	24.639	-25.691	-25.500	+390
Seluruh citra	28.182	-26.373	-24.230	+5.325



Sumber data:

Pra Kebakaran Landsat 8 OLI-TIRS, 29 Agustus 2024 (LC08_L2SP_116066_20240829_20240905_02_T1)

Pasca Kebakaran 14 September 2024 (LC08_L2SP_116066_20240914_20240920_02_T1)

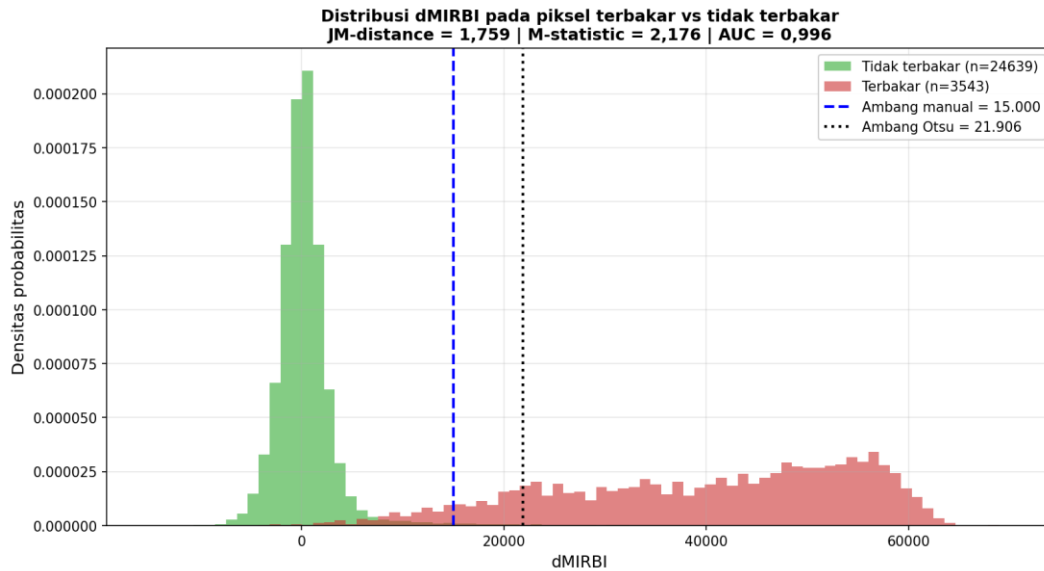
Gambar 2. (a) MIRBI pra-kebakaran; (b) MIRBI pasca-kebakaran dengan overlay titik panas; (c) citra selisih dMIRBI; (d) hasil deteksi pada ambang 15.000 dibandingkan poligon kontrol Sentinel-2A (garis biru). Peta ditampilkan pada sistem koordinat UTM Zona 50S/WGS 84.

Hasil pengujian separabilitas spektral disajikan pada Tabel 3. JM-distance 1,759 berada dekat saturasi maksimum 2,0; M-statistic 2,176 jauh di atas ambang separabilitas 1,0; dan

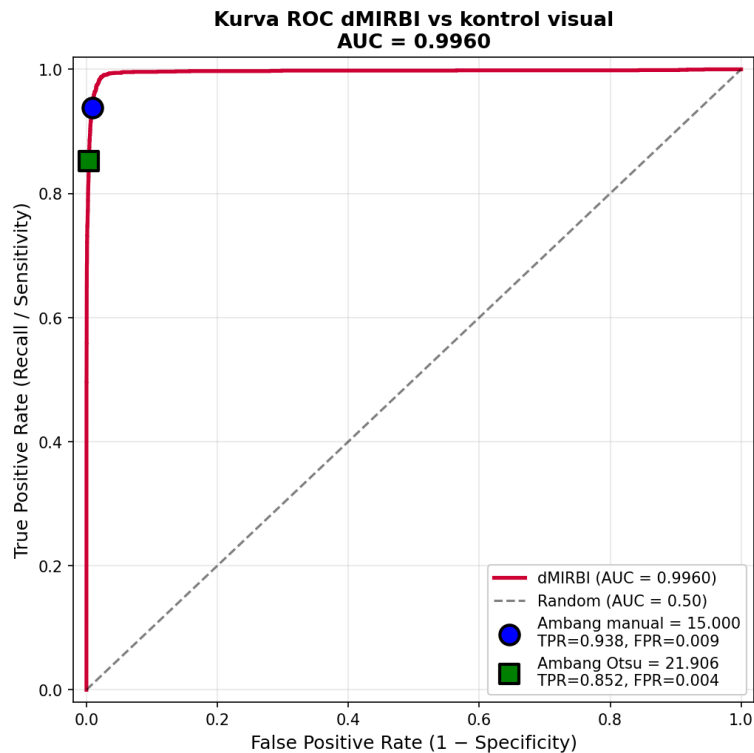
AUC 0,9960 menempatkan dMIRBI sebagai klasifikator yang hampir sempurna (Gambar 3 dan 4).

Tabel 3. Metrik separabilitas statistik distribusi dMIRBI antara piksel terbakar dan tidak terbakar.

Metrik	Nilai	Rentang	Interpretasi
Bhattacharyya (B)	2,115	$[0, \infty)$	Pemisahan kuat
Jeffries-Matusita	1,759	$[0; 2]$	Sangat baik
Kaufman-Remer M	2,176	$M > 1$	Terpisah tegas
AUC ROC	0,9960	$[0,5; 1,0]$	Hampir sempurna



Gambar 3. Distribusi densitas dMIRBI pada piksel terbakar (merah) vs tidak terbakar (hijau). Garis vertikal: ambang manual 15.000 (biru) dan ambang Otsu 21.906 (hitam).



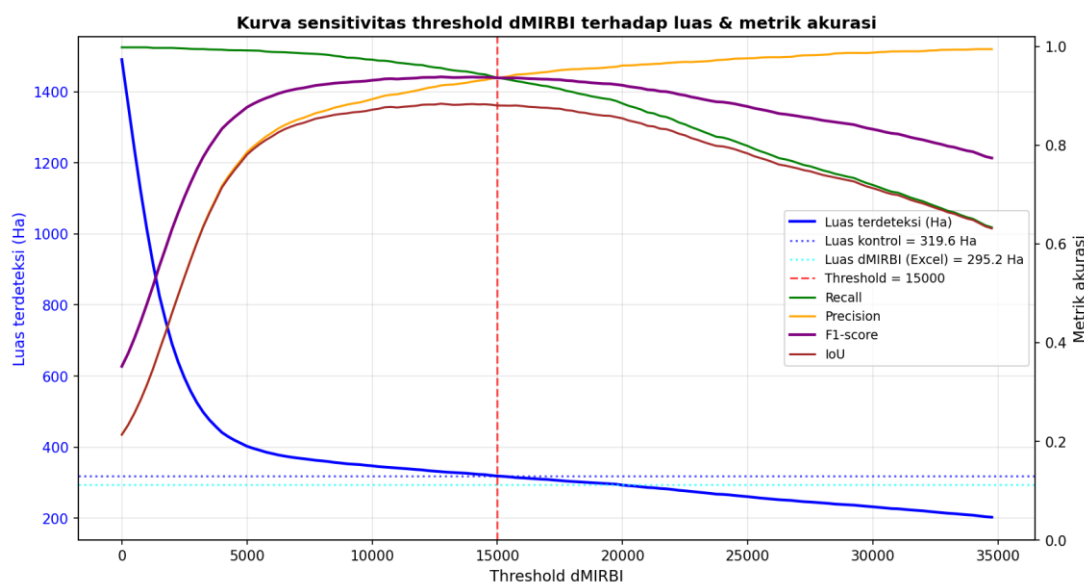
Gambar 4. Kurva ROC dMIRBI vs kontrol Sentinel-2A; AUC = 0,9960.

Persentil ke-5 dari kelas terbakar (13.620) bahkan lebih besar dari persentil ke-95 dari kelas tidak-terbakar (4.312). Artinya, rentang antara 5.000 sampai 13.000 adalah koridor aman untuk mencari ambang operasional.

Sembilan nilai ambang dievaluasi terhadap kontrol Sentinel-2A. Hasilnya disajikan pada Tabel 4. Semakin tinggi ambang, luas terdeteksi menurun, *recall* menurun, dan *precision* meningkat (Gambar 5).

Tabel 4. Evaluasi sensitivitas sembilan ambang dMIRBI terhadap kontrol Sentinel-2A (319,6066 Ha). *Selisih positif: luas terdeteksi lebih kecil dari kontrol. **Ambang Otsu.

Ambang	Luas (Ha)	Selisih*	Recall	Prec.	F1	IoU	Kappa	OA
7.000	369,63	-50,02	0,987	0,851	0,914	0,842	0,895	0,977
10.000	347,49	-27,88	0,973	0,893	0,932	0,872	0,921	0,982
12.000	335,97	-16,36	0,962	0,913	0,937	0,882	0,927	0,984
13.900	325,98	-6,37	0,949	0,928	0,939	0,884	0,930	0,984
15.000	318,87	+0,74	0,937	0,937	0,937	0,881	0,927	0,984
18.000	303,48	+16,13	0,908	0,954	0,930	0,870	0,919	0,983
19.800	295,56	+24,05	0,889	0,959	0,923	0,856	0,912	0,981
21.906**	281,61	+38,00	0,854	0,967	0,907	0,830	0,895	0,978
25.000	260,82	+58,79	0,798	0,976	0,879	0,783	0,866	0,972



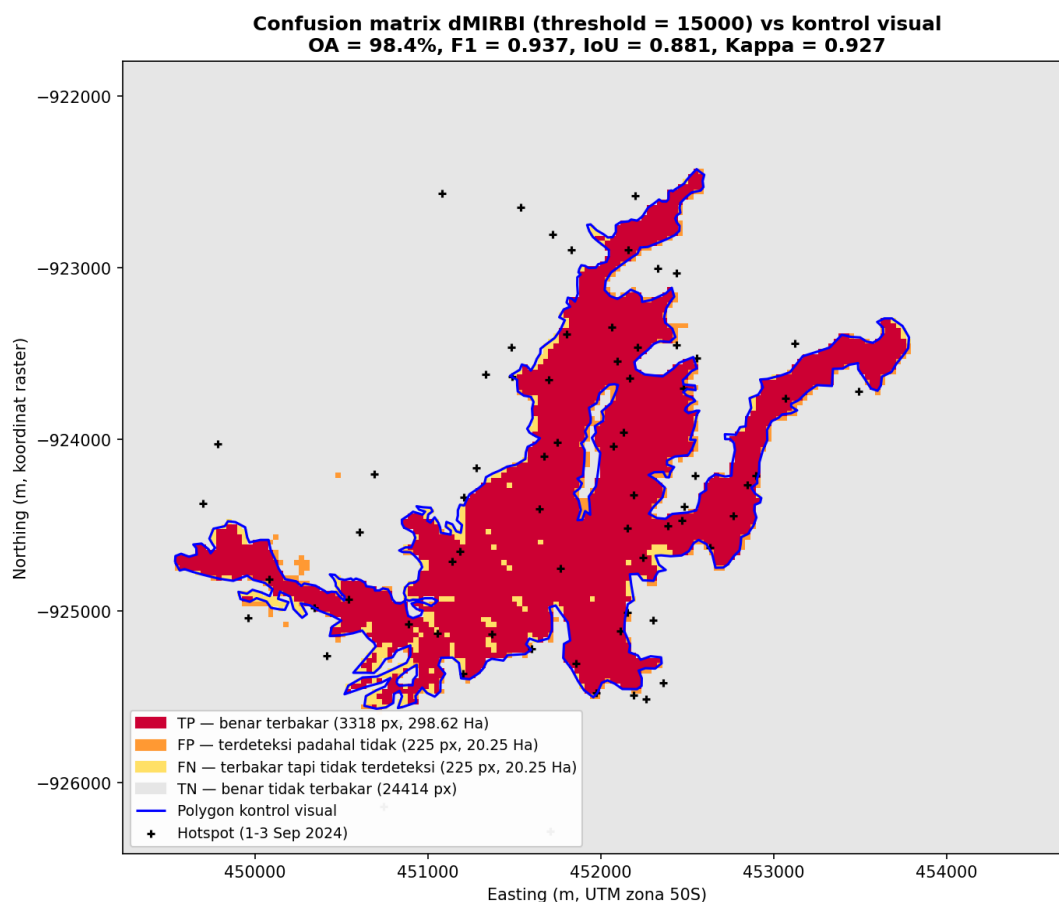
Gambar 5. Kurva sensitivitas luas terdeteksi (sumbu kiri) dan metrik akurasi (sumbu kanan) sebagai fungsi ambang dMIRBI.

Nilai F1 tertinggi diperoleh pada ambang 13.900, sedangkan ambang 15.000 dipilih berdasarkan kedekatan estimasi luas terhadap poligon kontrol. Ambang empiris 15.000 menyeimbangkan recall dan precision pada angka identik 0,937 dan menghasilkan luas terdeteksi 318,87 Ha — hanya 0,74 Ha (0,2%)

berbeda dari kontrol Sentinel-2A. F1 sebesar 0,937 memiliki interval kepercayaan bootstrap 95% [0,930; 0,942] (n = 1.000 *resamples*). Ambang Otsu yang dihitung murni dari distribusi dMIRBI menghasilkan nilai 21.906 dengan luas terdeteksi 281,61 Ha (*recall* 0,854, *precision* 0,967, F1 0,907, *kappa* 0,895).

Tabel 5. Konvergensi estimasi luas terbakar Bukit Anak Dara dari berbagai pendekatan independen.

Pendekatan	Referensi	Luas (Ha)	Δ visual (Ha)
Laporan pengelola	BKPH Rinjani Timur (2024)	286,00	-33,61
dBAI-Otsu	Prasetyo et al. (2025)	273,20	-46,41
dMIRBI-Otsu	Penelitian ini	281,61	-37,99
dMIRBI ambang 15.000	Penelitian ini	318,87	-0,74
Poligon visual S-2A	Penelitian ini (acuan)	319,61	0



Gambar 6. Peta confusion matrix dMIRBI ≥ 15.000 vs kontrol Sentinel-2A. Merah = TP; oranye = FP (komisi); kuning = FN (omisi); abu-abu = TN. Tanda + hitam = titik panas SiPongi+/FIRMS 1-3 September 2024.

Pada ambang 15.000, kesalahan klasifikasi terdistribusi seimbang: 20,25 Ha komisi dan 20,25 Ha omisi. Sebaran spasialnya (Gambar 6) hampir seluruhnya berada di tepi poligon kontrol. Inti area terbakar tercakup hampir sempurna oleh deteksi MIRBI.

Berdasarkan distribusi titik panas SiPongi+/FIRMS per tanggal dan overlap dengan poligon kontrol dan deteksi dMIRBI, diketahui 49 titik panas terkonsentrasi pada 2 September 2024 (71% dari total) menandai hari tersebut sebagai puncak intensitas. Hanya 36 dari 69 titik (52,2%) berada di dalam poligon

kontrol, dan 37 titik (53,6%) di dalam deteksi dMIRBI pada ambang 15.000. Nilai dMIRBI pada lokasi titik panas bervariasi sangat luas (rentang -4.743 sampai +62.669; median 18.069).

Pembahasan

Pola perubahan MIRBI sebelum dan sesudah kebakaran sejalan dengan mekanisme spektral yang dijelaskan Trigg dan Flasse (2001): permukaan terbakar memiliki kontras reflektansi SWIR1-SWIR2 yang khas dan dieksploitasi langsung oleh formulasi MIRBI.

Lonjakan median MIRBI sebesar +43.622 unit di dalam poligon (dari -39.383 ke +4.239), dibandingkan kenaikan hanya +191 unit di luar poligon, menunjukkan respons indeks yang sangat tajam terhadap kebakaran savana rumput pada lereng Anak Dara.

Nilai JM-distance 1,759 dan M-statistic 2,176 yang diperoleh pada studi ini sebanding atau bahkan lebih tinggi dari yang dilaporkan Pacheco et al. (2023) untuk dMIRBI pada biome Brasil (M-statistic sekitar 1,5-2,0) dan Gospodinova et al. (2025) untuk kebakaran Bulgaria. Artinya, kontras spektral yang dihasilkan oleh kebakaran savana rumput pada lereng Anak Dara termasuk kategori yang paling ideal untuk dipisahkan secara otomatis.

Temuan paling penting dari studi ini adalah konvergensi beberapa pendekatan independen pada sumber yang berbeda (Tabel 5). Ambang empiris 15.000 dikalibrasi terhadap interpretasi visual dan, sesuai disain, menghasilkan luas yang sangat dekat dengan poligon visual (selisih 0,74 Ha). Yang lebih menarik dari sudut pandang metodologis: ambang Otsu yang murni data-driven menghasilkan 281,61 Ha — hanya 4,4 Ha lebih kecil dari laporan resmi BKPH Rinjani Timur sebesar 286 Ha. Dua pendekatan yang sama sekali independen konvergen pada angka yang konsisten.

Selisih sekitar 34 Ha antara estimasi pengelola lapangan (286 Ha) dan interpretasi visual Sentinel-2A (319,61 Ha) bukan kontradiksi. Laporan lapangan biasanya terbatas pada area yang dapat diakses atau diverifikasi langsung, sedangkan interpretasi visual citra dapat menjangkau seluruh perimeter termasuk zona tepi yang sulit dijangkau dari darat. Ambang Otsu menghasilkan estimasi konservatif (precision 0,967) yang konsisten dengan inti kebakaran. Ambang 15.000 menangkap seluruh perimeter termasuk zona tepi.

Pola "kesalahan di tepi, akurasi di inti" yang terlihat pada Gambar 6 juga dilaporkan oleh Vetrta et al. (2024) pada pemantauan nasional Indonesia dan Arisanty et al. (2022) di Banjarbaru. Hal ini menunjukkan keterbatasan umum pemetaan area terbakar berbasis indeks spektral: zona transisi memang sulit didefinisikan secara obyektif, bahkan untuk interpretasi visual yang teliti.

Hanya 52,2% titik panas SiPongi+/FIRMS yang berada di dalam poligon kontrol. Variasi nilai dMIRBI pada lokasi titik panas (rentang

-4.743 sampai +62.669) cukup besar untuk dianggap bermakna: tidak semua titik panas meninggalkan jejak bekas terbakar yang signifikan dalam MIRBI. Tiga faktor masuk akal untuk menjelaskannya. Pertama, titik panas mendeteksi anomali suhu sesaat pada saat satelit overpass, sedangkan MIRBI mendeteksi perubahan permukaan yang persisten. Kedua, resolusi piksel hotspot VIIRS 375 m atau MODIS 1 km (Schroeder et al., 2014) jauh lebih kasar dibanding 30 m Landsat. Ketiga, sebagian titik panas kemungkinan mendeteksi asap atau api permukaan singkat yang tidak meninggalkan jejak arang yang signifikan. Temuan ini sejalan dengan praktik yang direkomendasikan Vetrta et al. (2024) untuk pemantauan nasional Indonesia: titik panas FIRMS sebaiknya digunakan sebagai filter temporal, sedangkan indeks spektral seperti MIRBI digunakan untuk pemetaan luas spasial.

Kontribusi metodologis studi ini terletak pada tiga aspek. Pertama, analisis sensitivitas pada sembilan ambang yang memperlihatkan bahwa ambang empiris 15.000 memberikan akurasi yang mendekati analisis visual sentinel 2A ($F1 = 0,937$), atau 0,028 lebih tinggi dari ambang Otsu (0,907). Implikasinya: pada konteks MIRBI di savana pegunungan tropis, ambang Otsu cenderung konservatif dan kalibrasi terhadap referensi visual dapat meningkatkan akurasi. Meskipun poligon visual Sentinel-2A digunakan sebagai acuan, hasil tersebut tetap mengandung ketidakpastian, terutama pada zona tepi kebakaran. Oleh karena itu, kedekatan luas dMIRBI 15.000 terhadap poligon kontrol tidak harus ditafsirkan sebagai kebenaran mutlak, tetapi sebagai indikasi kesesuaian spasial terhadap referensi visual.

Kedua, nilai AUC 0,9960 yang bersifat threshold-independent memperkuat klaim bahwa kapabilitas diskriminatif dMIRBI memang tinggi terlepas dari pemilihan ambang spesifik. Ketiga, bootstrap CI yang sempit [0,930; 0,942] menunjukkan stabilitas metrik yang tinggi.

Studi ini memiliki keterbatasan yang perlu disampaikan. Pertama, hanya satu peristiwa kebakaran di satu ekosistem yang dianalisis; replikasi pada lokasi savana Lesser Sunda yang lain akan memperkuat generalisabilitas, sebagaimana dilakukan pada pemantauan nasional Vetrta et al. (2024) untuk seluruh Indonesia. Kedua, ambang empiris 15.000 berlaku spesifik pada konfigurasi data ini

(Landsat 30 m, savana NTB, interval pra-pasca pendek); transferabilitas perlu diuji pada sensor lain seperti Sentinel-2, atau pada konteks ekosistem berbeda seperti yang dilakukan pada peristiwa Bromo (Suhardono et al., 2024). Ketiga, kontrol yang dipakai tetap merupakan interpretasi visual; verifikasi lapangan langsung di tepi poligon akan menjadi langkah validasi yang lebih kuat. Keempat, ambang Otsu yang dievaluasi pada level *scene-wide* bisa jadi tidak optimal untuk lokasi yang heterogen — pengembangan ambang Otsu lokal atau strategi thresholding alternatif (*Triangle, percentile-based*) adalah arah pengembangan yang masuk akal ke depan.

KESIMPULAN

Indeks dMIRBI yang dihitung dari citra Landsat 8 OLI-TIRS terbuka terbukti efektif membedakan area terbakar dan tidak-bertembak pada peristiwa kebakaran Bukit Anak Dara, Lombok Timur. Separabilitas spektral antara kedua kelas tergolong sangat kuat (JM = 1,759; M-statistic = 2,176; AUC = 0,9960).

Ambang empiris dMIRBI ≥ 15.000 layak digunakan sebagai ambang operasional karena menghasilkan luas yang hampir identik dengan kontrol visual Sentinel-2A (318,87 Ha; F1 = 0,937; OA = 98,4%). Ambang otomatis Otsu (21.906) bersifat lebih konservatif (281,61 Ha) namun konsisten dengan laporan resmi BKPH Rinjani Timur (286 Ha) tanpa memerlukan kalibrasi terhadap data acuan.

Penelitian lanjutan perlu menguji transferabilitas ambang lintas sensor (misalnya Sentinel-2 10 m), replikasi lintas lokasi pada ekosistem savana yang lebih beragam, serta validasi lapangan langsung untuk memastikan keandalan pendekatan ini pada skala operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Mataram melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) sumber dana PNPB tahun anggaran 2025 atas dukungan pendanaan; United States Geological Survey (USGS) atas penyediaan citra Landsat 8 OLI-TIRS L2SP secara terbuka; European Space Agency (ESA) melalui Copernicus Open Access Hub atas penyediaan citra Sentinel-2A;

NASA FIRMS atas data titik panas VIIRS dan MODIS; Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia melalui SiPongi+ atas data karhutla nasional; serta Balai Kesatuan Pengelolaan Hutan Lindung (KPHL) Rinjani Timur dan Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Provinsi NTB atas akses lokasi dan informasi konteks peristiwa kebakaran Bukit Anak Dara, September 2024. Penulis juga berterima kasih kepada Fakultas Pertanian Universitas Mataram atas dukungan institusional.

DAFTAR PUSTAKA

- Achour, H., Viedma, O., Soltani, Z., Habibi, I., & Jaouadi, W. (2025). OtsuSeg: an R package implementing Otsu's thresholding technique for mapping forest fire scars with integrated accuracy assessment. *Spatial Information Research*, 33, 42. <https://doi.org/10.1007/s41324-025-00644-x>
- Arisanty, D., Feindhi Ramadhan, M., Angriani, P., Muhaimin, M., Nur Saputra, A., Puji Hastuti, K., Rosadi, D., & Mishra, R. K. (2022). Utilizing Sentinel-2 data for mapping burned areas in Banjarbaru wetlands, South Kalimantan Province. *International Journal of Forestry Research*, 2022, 7936392. <https://doi.org/10.1155/2022/7936392>
- Arjasakusuma, S., Kusuma, S. S., Vetrira, Y., Prasasti, I., & Arief, R. (2022). Monthly burned-area mapping using multi-sensor integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 and machine learning: Case study of 2019's fire events in South Sumatra Province, Indonesia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100790. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100790>
- Chuvieco, E., Martín, 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. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Dinas LHK NTB. (2024). *Laporan kebakaran kawasan Bukit Anak Dara, BKPH Rinjani Timur, Kabupaten Lombok Timur, 31 Agustus - 2 September 2024*. Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Provinsi

- Nusa Tenggara Barat.[Dokumen tidak dipublikasikan]
- Filipponi, F. (2018). BAIS2: Burned Area Index for Sentinel-2. *Proceedings*, 2(7), 364. <https://doi.org/10.3390/ecrs-2-05177>
- Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>
- Gaveau, D. L. A., Descals, A., Salim, M. A., Sheil, D., & Sloan, S. (2021). Refined burned-area mapping protocol using Sentinel-2 data increases estimate of 2019 Indonesian burning. *Earth System Science Data*, 13(11), 5353–5368. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5353-2021>
- Gospodinova, V., Filcheva, E., Pironkov, P., & Krastev, K. (2025). Estimation of forest fire burned area and burn severity degrees using Sentinel-2 data. *Forestry Ideas*, 31, 27–40.
- Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Morgan, P., Rollins, M. G., & Gessler, P. E. (2005). Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(21), 4801–4808. <https://doi.org/10.1080/01431160500239008>
- Kaufman, Y. J., & Remer, L. A. (1994). Detection of forests using mid-IR reflectance: An application for aerosol studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3), 672–683. <https://doi.org/10.1109/36.297984>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA): Sampling and analysis methods. In D. C. Lutes (Ed.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (General Technical Report RMRS-GTR-164-CD). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Kurbanov, E., Vorobev, O., Lezhnin, S., Sha, J., Wang, J., Li, X., Cole, J., Dergunov, D., & Wang, Y. (2022). Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: A review. *Remote Sensing*, 14(19), 4714. <https://doi.org/10.3390/rs14194714>
- Liu, S., Zheng, Y., Dalponte, M., & Tong, X. (2020). A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data. *European Journal of Remote Sensing*, 53(1), 104–112. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1738900>
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Pacheco, A. d. P., da Silva Junior, J. A., Ruiz-Armenteros, A. M., Henriques, R. F. F., & de Oliveira Santos, I. (2023). Analysis of spectral separability for detecting burned areas using Landsat-8 OLI/TIRS images under different biomes in Brazil and Portugal. *Forests*, 14(4), 663. <https://doi.org/10.3390/f14040663>
- Prasetyo, A. R., Valentino, N., Silamon, R. F., Idris, M. H., Latifah, S., Aji, I. M. L., & Pratama, R. P. (2025). Burned area mapping using Δ BAI–Otsu from Landsat 8 imagery in Bukit Anak Dara East Lombok. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(4b), 354–362. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i4b.10836>
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csizsar, I. A. (2014). The new VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Suhardono, S., Fitria, L., Suryawan, I. W. K., Septiariva, I. Y., Mulyana, R., Sari, M. M., Ulhasanah, N., & Prayogo, W. (2024). Human activities and forest fires in Indonesia: An analysis of the Bromo incident and implications for conservation tourism. *Trees, Forests and People*, 15, 100509. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100509>
- Sutomo, & van Etten, E. J. B. (2023). Fire impacts and dynamics of seasonally dry tropical forest of East Java, Indonesia. *Forests*, 14(1), 106. <https://doi.org/10.3390/f14010106>

Trigg, S., & Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2641–2647. <https://doi.org/10.1080/01431160110053185>

Vetrita, Y., Albar, I., Santoso, I., Prasasti, I., Kartika, T., Usman, A., Tosiani, A.,

Haryanto, D., Famurianty, E., Ulfa, K., & Purwanto, J. (2024). Monthly mapping of Indonesia's burned areas: Implementation, history, techniques, and future directions. *International Journal of Remote Sensing*, 46(2), 636–660. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2421942>