

Analisis Perubahan Spasial Badan Air Menggunakan Citra Landsat Multitemporal Daerah Torobulu Sulawesi Tenggara

¹Abd. Hadid Rahman Ulfa dan ¹Tri Utomo Taliding*

¹Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Matematik dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Jalan H.E.A. Mokodompit Kendari 93232, Indonesia

* Corresponding author: triuotomotaliding@uho.ac.id

Received: Jun 2, 2026; Accepted: Jun 21, 2026.

DOI: <https://doi.org/10.31764/jpl.v7i1.40644>

Abstrak. Daerah Torobulu, Sulawesi Tenggara, mengalami perkembangan aktivitas pemanfaatan lahan yang intensif sehingga memengaruhi kondisi hidrologi dan keberadaan badan air. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan spasial badan air di kawasan tersebut menggunakan citra Landsat multitemporal. Data yang digunakan meliputi citra Landsat 5 TM (1999) Surface Reflectance, Landsat 8 OLI (2020) Surface Reflectance, dan Landsat 9 OLI-2 (2025) Surface Reflectance, divalidasi dengan data curah hujan CHIRPS. Ekstraksi badan air dilakukan menggunakan empat indeks spektral, yaitu NDWI, MNDWI, WRI, dan AWEI_{sh}, dengan pendekatan voting multi indeks (≥ 3 dari 4 indeks) untuk menentukan hasil akhir. Berdasarkan voting multi indeks Hasil penelitian menunjukkan peningkatan luas badan air yang signifikan, dari 0,641 ha (0,052%) pada tahun 1999 menjadi 5,953 ha (0,485%) pada tahun 2020, dan 14,965 ha (1,219%) pada tahun 2025. MNDWI secara konsisten menghasilkan estimasi luas terbesar, sedangkan AWEI_{sh} paling selektif. Analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan terkuat antara WRI dan NDWI ($r = 0,93$), diikuti MNDWI dan NDWI ($r = 0,82$), sedangkan AWEI_{sh} menunjukkan korelasi lemah dengan ketiga indeks lainnya ($r = 0,10-0,37$). Pendekatan voting multi indeks terbukti efektif mengurangi kesalahan klasifikasi dan menghasilkan peta badan air yang lebih representatif dibandingkan penggunaan indeks tunggal.

Kata Kunci: Badan air; Citra Landsat; Indeks Spektral; Torobulu.

Abstract. The Torobulu area in Southeast Sulawesi has experienced intensive land-use development that affects hydrological conditions and the presence of water bodies. This study aims to analyze the spatial changes of water bodies in the area using multitemporal Landsat imagery. The data used include Landsat 5 TM (1999) Surface Reflectance, Landsat 8 OLI (2020) Surface Reflectance, and Landsat 9 OLI-2 (2025) Surface Reflectance, validated with CHIRPS rainfall data. Water body extraction was performed using four spectral indices, namely NDWI, MNDWI, WRI, and AWEI_{sh}, applying a multi-index voting approach (≥ 3 of 4 indices) to determine the final classification. Based on the multi-index voting, the results show a significant increase in water body area, from 0.641 ha (0.052%) in 1999 to 5.953 ha (0.485%) in 2020, and 14.965 ha (1.219%) in 2025. MNDWI consistently produced the largest area estimate, while AWEI_{sh} was the most selective. Pearson correlation analysis revealed the strongest relationship between WRI and NDWI ($r = 0.93$), followed by MNDWI and NDWI ($r = 0.82$), while AWEI_{sh} showed weak correlations with the other three indices ($r = 0.10-0.37$). The multi-index voting approach proved effective in reducing classification errors and produced a more representative water body map compared to using a single index.

Keywords: Landsat imagery; spectral index; Torobulu; water body.

1. Pendahuluan

Daerah Torobulu di Sulawesi Tenggara merupakan wilayah yang mengalami perkembangan aktivitas pemanfaatan lahan yang cukup intensif dalam beberapa dekade terakhir, termasuk pembangunan infrastruktur, kegiatan pertanian, serta aktivitas pertambangan nikel yang berpotensi mempengaruhi kondisi hidrologi dan keberadaan badan air. Perubahan penggunaan lahan tersebut dapat menyebabkan perubahan luas maupun distribusi spasial badan air yang perlu dipantau secara berkala.

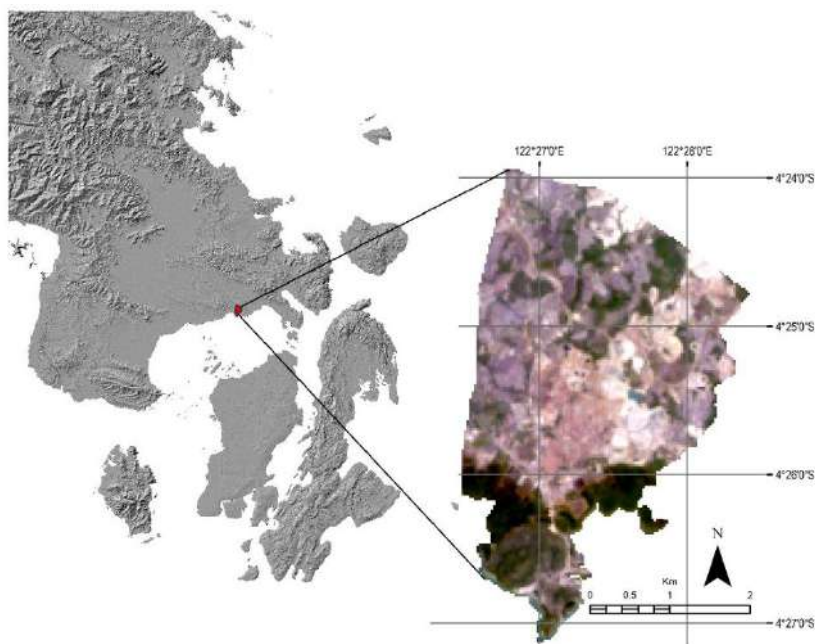
Perkembangan teknologi penginderaan jauh memungkinkan pemantauan badan air dilakukan secara efektif dalam cakupan wilayah yang luas dan periode waktu yang panjang (Rokni dkk, 2014). Salah satu sumber data yang banyak digunakan adalah citra satelit Landsat karena memiliki arsip data multitemporal yang panjang, resolusi spasial yang memadai, serta tersedia secara bebas. Analisis multitemporal menggunakan citra Landsat memungkinkan identifikasi perubahan spasial badan air dari waktu ke waktu sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi dinamika lingkungan pada suatu wilayah (Rokni dkk, 2014).

Normalized Difference Water Index (NDWI) adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengekstraksi informasi badan air. Metode ini memanfaatkan indeks spektral berupa kombinasi antara band *green* dan band *near infrared* (NIR) untuk meningkatkan identifikasi badan air pada citra satelit (Mcfeeters, 1996). Namun, pada beberapa kondisi penggunaan lahan, terutama daerah dengan vegetasi rapat atau area terbangun, NDWI sering menghasilkan kesalahan klasifikasi akibat kemiripan respons spektral objek non-air dengan badan air.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, Hanqiu Xu (2006) mengembangkan *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) dengan menggantikan band *Near Infrared* (NIR) menggunakan band *shortwave infrared* (SWIR). Metode MNDWI terbukti mampu meningkatkan kontras antara badan air dan objek di sekitarnya, sekaligus menekan gangguan dari vegetasi, tanah terbuka, maupun area terbangun. Oleh karena itu, MNDWI dinilai lebih efektif dalam mengekstraksi dan memetakan badan air dibandingkan NDWI konvensional (Xu, 2006).

Selain NDWI dan MNDWI, beberapa indeks lain juga telah dikembangkan untuk meningkatkan akurasi deteksi badan air pada berbagai kondisi lingkungan. *Water Ratio Index* (WRI) menggunakan rasio kombinasi band *Green*, *Red*, NIR, dan SWIR untuk membedakan badan air dari objek non-air. Metode ini mampu meningkatkan identifikasi badan air pada area dengan tutupan vegetasi yang kompleks maupun pada wilayah dengan variasi kelembapan permukaan yang tinggi (Shen dan Li, 2010). Namun demikian, sensitivitas WRI terhadap kondisi atmosfer dan variasi tutupan lahan dapat menyebabkan ketidakstabilan hasil klasifikasi pada beberapa wilayah.

Metode lain yang banyak digunakan adalah *Automated Water Extraction Index* (AWEI) yang diperkenalkan oleh Feyisa dkk. (2014). AWEI dikembangkan untuk mengurangi pengaruh bayangan (*shadow*) dari topografi, bangunan, maupun vegetasi yang sering menyebabkan kesalahan klasifikasi badan air. Dengan memanfaatkan kombinasi beberapa band spektral, AWEI terbukti mampu meningkatkan akurasi ekstraksi badan air terutama pada wilayah yang memiliki kompleksitas tutupan lahan dan kondisi pencahayaan yang beragam (Feyisa dkk., 2014).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian

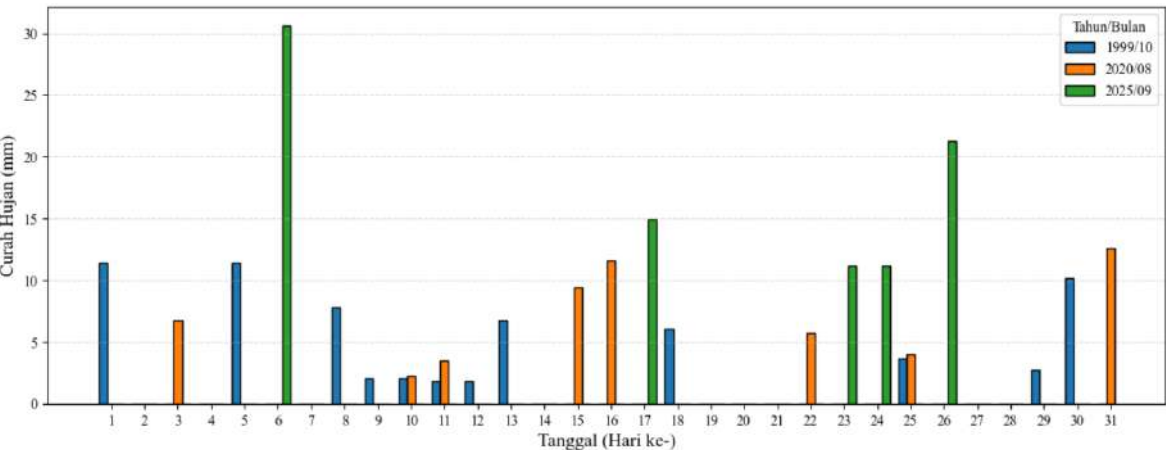
2. Data dan Metode Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa citra Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI, dan Landsat 9 OLI-2 Collection 2 Level-2 Surface Reflectance (Tabel 1). Produk Level-2 merupakan data yang telah melalui koreksi geometrik, radiometrik, dan atmosfer sehingga menghasilkan nilai reflektansi permukaan (*Surface Reflectance*).

Tabel 1. Spesifikasi Data

Satelit	Sensor	Produk	Tanggal Akuisisi	Path/Row	Cloud Cover (%)	Resolusi (m)	Panjang Gelombang (μm)
Landsat 9	OLI-2	Level-2	29/09/2025	112/63	15.51	30	Band 1: 0.435–0.451
							Band 2: 0.452–0.512
							Band 3: 0.533–0.590
							Band 4: 0.636–0.673
							Band 5: 0.851–0.879
							Band 6: 1.566–1.651
							Band 7: 2.107–2.294
Landsat 8	OLI	Level-2	06/08/2020	112/63	7.08	30	Band 1: 0.435–0.451
							Band 2: 0.452–0.512
							Band 3: 0.533–0.590
							Band 4: 0.636–0.673
							Band 5: 0.851–0.879
							Band 6: 1.566–1.651
							Band 7: 2.107–2.294
Landsat 5	TM	Level-2	16/10/1999	112/63	10	30	Band 1: 0.45–0.52
							Band 2: 0.52–0.60
							Band 3: 0.63–0.69
							Band 4: 0.76–0.90
							Band 5: 1.55–1.75
							Band 6: 2.13–2.135
							Band 7: 2.08–2.35

Data lain untuk memvalidasi akuisisi citra landsat agar terhindar dari *noise* yaitu data curah hujan. Hujan dapat membuat *noise* berupa tutupan awan, kelembapan dan badan air baru yang sebenarnya bukan badan air. Data curah hujan di validasi berdasarkan data *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) yang dapat diakses pada laman <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>.



Gambar 2. Data curah hujan pada tahun 1999 bulan 10 berwarna biru, tahun 2020 bulan 8 berwarna orange dan tahun 2025 bulan 9 berwarna hijau (Sumber data: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>)

2.1 Normalized Difference Water Index (NDWI)

Normalized Difference Water Index (NDWI) merupakan metode yang digunakan dalam analisis citra satelit untuk mengidentifikasi dan memetakan badan air terbuka. Indeks ini memanfaatkan kombinasi band *Green* dan band *Near Infrared* (NIR), di mana air menunjukkan reflektansi yang tinggi pada band *Green* dan rendah pada band *Near Infrared* (NIR). Perbedaan karakteristik spektral tersebut memungkinkan NDWI membedakan badan air dari objek di sekitarnya secara efektif (Mcfeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (1)$$

2.2 Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) merupakan indeks yang efektif untuk ekstraksi badan air karena mampu mengurangi pengaruh area terbangun. Indeks ini menggunakan kombinasi band *Green* dan SWIR1, di mana air memiliki reflektansi rendah pada pita SWIR, sedangkan objek non-air seperti vegetasi, tanah terbuka, dan area terbangun memiliki reflektansi yang lebih tinggi. Perbedaan karakteristik spektral tersebut menghasilkan nilai positif pada badan air dan nilai negatif pada sebagian besar objek non-air, sehingga MNDWI lebih efektif dalam membedakan badan air dibandingkan NDWI (Xu, 2006).

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR1)}{(Green + SWIR1)} \quad (2)$$

2.3 Water Ratio Index (WRI)

Water Ratio Index (WRI) merupakan salah satu indeks yang digunakan untuk mendeteksi badan air berdasarkan perbedaan respons spektral antara objek air dan objek non-air. Indeks ini memanfaatkan rasio antara reflektansi pada band *Green* dan *Red*, dengan reflektansi pada band NIR dan SWIR1 (Shen dan Li, 2010; Laonamsai dkk, 2023). Karena badan air cenderung memiliki nilai reflektansi yang lebih rendah pada band NIR dan SWIR1 dibandingkan objek daratan, nilai WRI pada area perairan umumnya lebih tinggi daripada area non-perairan. Oleh karena itu, objek dapat diklasifikasikan sebagai badan air apabila nilai indeks WRI melebihi ambang batas 1 (Shen dan Li, 2010; Fang dkk, 2011).

$$WRI = \frac{(Green - Red)}{(NIR + SWIR1)} \quad (3)$$

2.4 Automated Water Extraction Index (AWEI)

Automated Water Extraction Index (AWEI) merupakan indeks yang dirancang untuk meningkatkan kemampuan identifikasi badan air pada citra penginderaan jauh. Indeks ini menggunakan kombinasi beberapa band yaitu *Blue*, *Green*, NIR, SWIR1, dan SWIR2, untuk membedakan badan air dan yang bukan badan air pada berbagai kondisi lingkungan (Laonamsai dkk, 2023). AWEI menggunakan nilai ambang nol sebagai batas klasifikasi, di mana nilai indeks positif umumnya merepresentasikan badan air, sedangkan nilai negatif menunjukkan objek selain air. Komponen tambahan yang ditandai dengan “sh” dalam persamaan berfungsi untuk mengurangi pengaruh bayangan, terutama pada area perkotaan yang memiliki permukaan gelap. Pendekatan ini memungkinkan pengenalan badan air yang lebih akurat dengan menekan kesalahan klasifikasi yang disebabkan oleh bayangan dan objek non-air lainnya (Feyisa dkk, 2014; Laonamsai dkk, 2023).

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2 \quad (4)$$

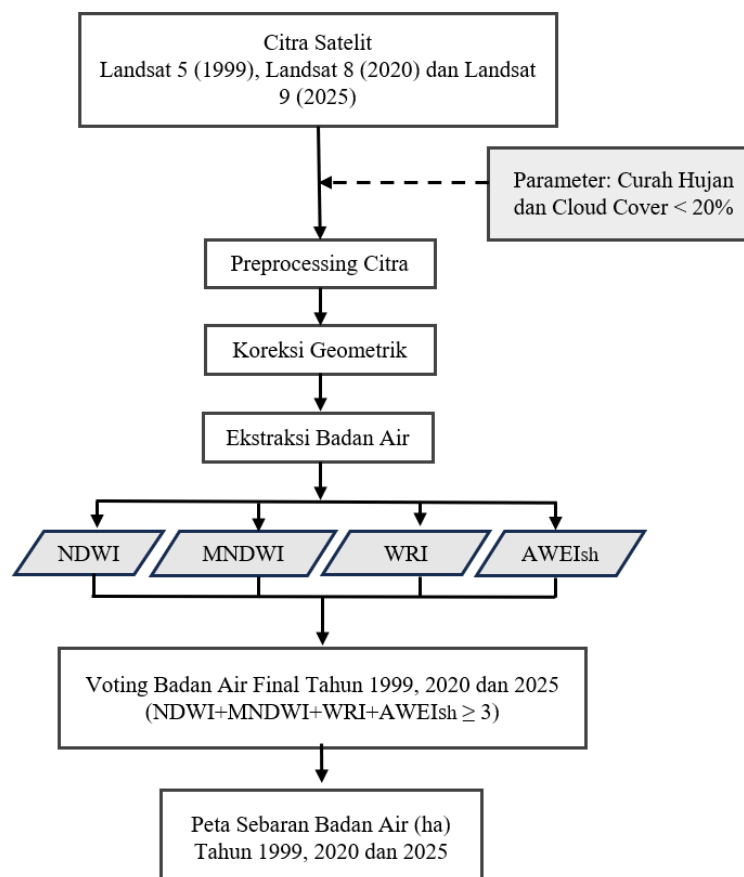
2.5 Ekstraksi data citra

Ekstraksi badan air pada penelitian ini dilakukan menggunakan empat indeks spektral, yaitu NDWI, MNDWI, WRI, dan AWEI_{sh} dengan menggunakan *threshold* masing – masing NDWI > 0, MNDWI > 0, WRI > 1 dan AWEI_{sh} > 0 (Laonamsai dkk, 2023; Mcfeeters, 1996; Xu 2006; Shen dan Li, 2010; Feyisa dkk, 2014). Keempat indeks tersebut memanfaatkan perbedaan karakteristik reflektansi air pada berbagai panjang gelombang untuk membedakan badan air dari objek non-air. Hasil ekstraksi badan air dari keempat indeks spektral tersebut ditentukan dari kesimpulan 3 dari 4 indeks spektral yang menyatakan badan air menghasilkan final badan air. Ringkasan rumus dan penggunaan band pada masing-masing sensor disajikan pada Tabel 2 dan alur pengolahan data penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 2. Perbandingan masing – masing citra berdasarkan band yang digunakan pada Indeks spektral

Indeks spektral	Rumus	Landsat 5	Landsat 8	Landsat 9	Referensi
NDWI (threshold > 0)	$\frac{(\text{Green} - \text{NIR})}{(\text{Green} + \text{NIR})}$	Green = Sr_B2 NIR = Sr_B4	Green = Sr_B3 NIR = Sr_B5	Green = Sr_B3 NIR = Sr_B5	Stuart K. Mcfeeters (1996)
MNDWI (threshold > 0)	$\frac{(\text{Green} - \text{SWIR1})}{(\text{Green} + \text{SWIR1})}$	Green = Sr_B2 SWIR1 = Sr_B5	Green = Sr_B3 SWIR1 = Sr_B6	Green = Sr_B3 SWIR1 = Sr_B6	Hanqiu Xu (2006)
WRI (threshold > 1)	$\frac{(\text{Green} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{SWIR1})}$	Green = Sr_B2 Red = Sr_B3 NIR = Sr_B4 SWIR1 = Sr_B5	Green = Sr_B3 Red = Sr_B4 Nir = Sr_B5 SWIR1 = Sr_B6	Green = Sr_B3 Red = Sr_B4 NIR = Sr_B5 SWIR1 = Sr_B6	Shen dan Li (2010)
AWEI _{sh} (threshold > 0)	$\text{Blue} + 2.5 \times \text{Green} - 1.5 \times (\text{NIR} + \text{SWIR1}) - 0.25 \times \text{SWIR2}$	Blue = Sr_B1 Green = Sr_B2 NIR = Sr_B4 SWIR1 = Sr_B5 SWIR2 = Sr_B7	Blue = Sr_B2 Green = Sr_B3 NIR = Sr_B5 SWIR1 = Sr_B6 SWIR2 = Sr_B7	Blue = Sr_B2 Green = Sr_B3 NIR = Sr_B5 SWIR1 = Sr_B6 SWIR2 = Sr_B7	Feyisa dkk (2014)

Catatan: Sr = Surface reflectance; B= Band

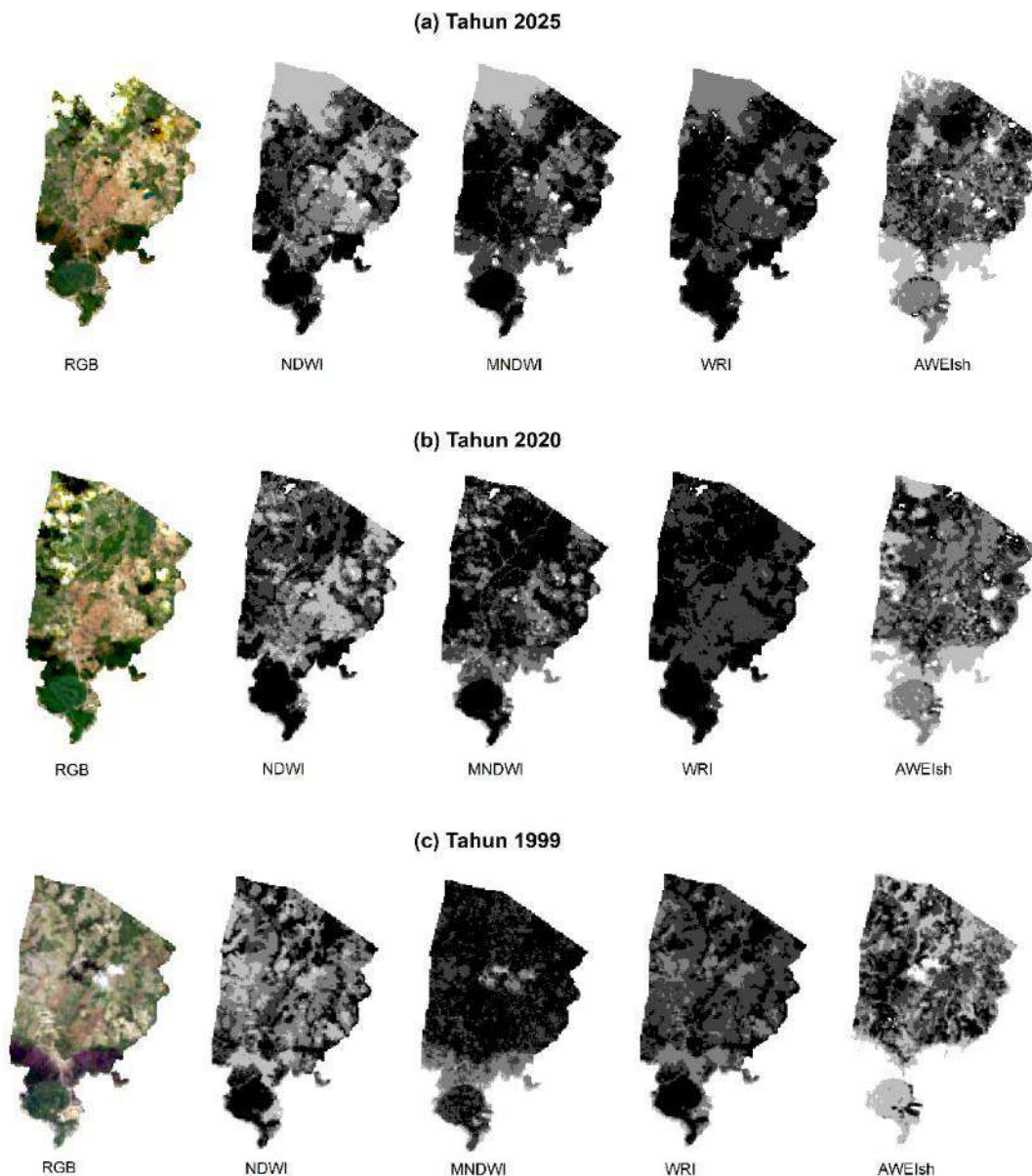
**Gambar 3.** Alur ekstraksi badan air dan perhitungan badan air penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis badan air pada daerah Torobulu dilakukan menggunakan pendekatan indeks spektral berbasis citra penginderaan jauh untuk mengidentifikasi distribusi dan perubahan luasan badan air

secara temporal. Penggunaan beberapa indeks bertujuan untuk membandingkan sensitivitas masing-masing metode dalam mendeteksi badan air serta mengevaluasi perubahan spasial badan air secara temporal.

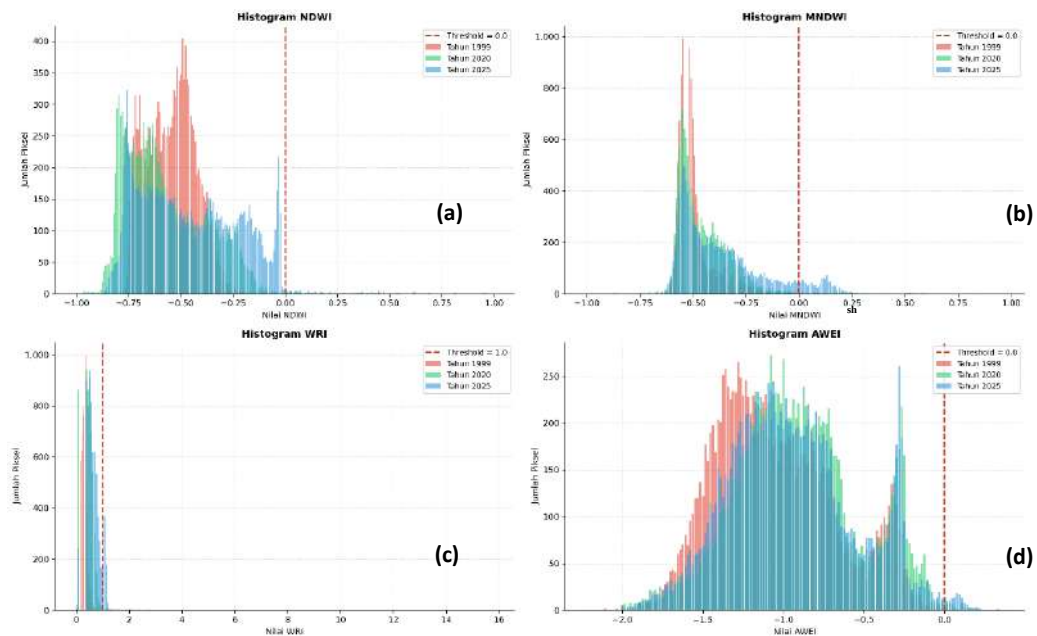
Gambar 4 menunjukkan hasil *preprocessing* citra dan koreksi geometrik. Tahap *preprocessing* citra meliputi pemilihan citra Landsat dengan tutupan awan rendah, *masking* awan dan bayangan awan, *clipping* area penelitian, penyamaan resolusi spasial, serta komposit band untuk visualisasi. Data yang digunakan berupa *Surface Reflectance* (Level-2), sehingga telah melalui koreksi radiometrik dan atmosfer. Selanjutnya dilakukan perhitungan indeks spektral (NDWI, MNDWI, WRI, dan $AWEI_{sh}$) sebelum proses *thresholding* untuk ekstraksi badan air.



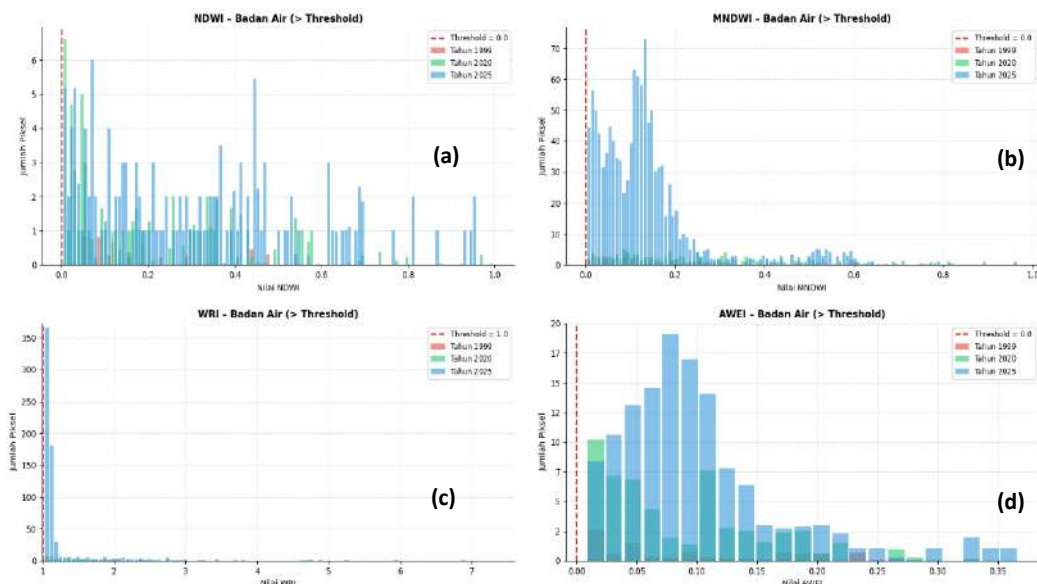
Gambar 4. Tampilan citra daerah Torobulu setelah *pre-processing*. (a) Citra Landsat 5 TM Tanggal akuisisi 16/10/1999, (b) Citra Landsat 8 OLI Tanggal akuisisi 06/08/2020 dan (c) Citra Landsat 9 OLI-2 Tanggal akuisisi 29/09/2025.

analisis histogram pada Gambar 5 dan Gambar 6 digunakan untuk melihat distribusi nilai indeks sebelum dan sesudah *thresholding*. Sebelum *thresholding*, NDWI dan MNDWI didominasi nilai negatif hingga mendekati nol, dengan pergeseran nilai ke arah positif dari tahun 1999 hingga 2025 yang menunjukkan peningkatan area berkarakteristik air. MNDWI memiliki distribusi yang lebih

sempit dan terfokus dibanding NDWI yang menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam meningkatkan kontras antara badan air dan non-air. WRI menunjukkan distribusi yang sangat terkonsentrasi pada rentang rendah dengan beberapa nilai ekstrem, menandakan sensitivitas tinggi namun berpotensi menangkap area non-air. Sementara itu, AWEI_{sh} memiliki distribusi yang lebih menyebar dengan pemisahan nilai yang lebih jelas antara badan air dan non-air.



Gambar 5. Perbandingan distribusi histogram indeks spektral daerah Torobulu tahun 1999, 2020 dan 2025. (a) NDWI, (b) MNDWI, (c) WRI dan (d) AWEI_{sh}



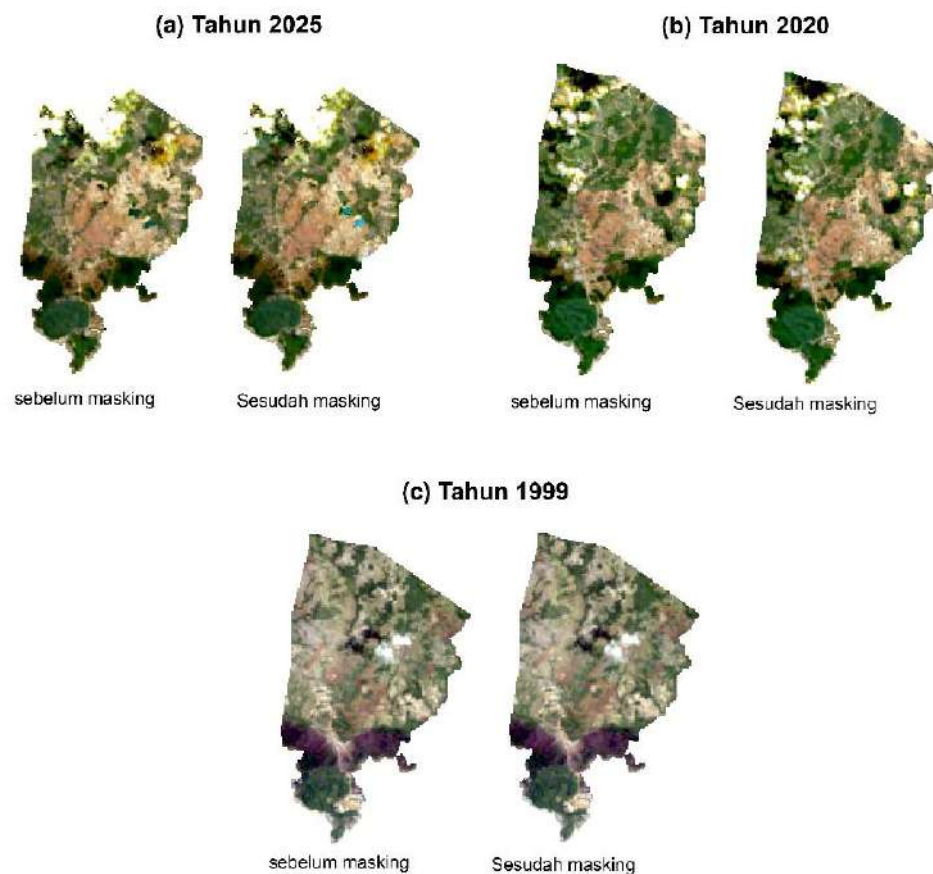
Gambar 6. Perbandingan distribusi histogram indeks spektral badan air daerah Torobulu tahun 1999, 2020 dan 2025. (a) NDWI, (b) MNDWI, (c) WRI dan (d) AWEI_{sh}

Gambar 6 menunjukkan distribusi histogram setelah dilakukan *thresholding*, yaitu hanya pada piksel yang teridentifikasi sebagai badan air. Pada NDWI, distribusi nilai badan air cenderung tersebar pada rentang 0–1, dengan peningkatan frekuensi yang cukup jelas pada tahun 2025. Hal ini

menunjukkan adanya peningkatan area badan air yang teridentifikasi pada periode terbaru. Pada MNDWI, distribusi badan air lebih terkonsentrasi pada nilai rendah mendekati nol hingga 0,3, yang menunjukkan bahwa sebagian besar badan air memiliki reflektansi yang homogen. Histogram WRI menunjukkan distribusi nilai badan air sangat didominasi oleh nilai rendah mendekati *threshold*, dengan frekuensi tertinggi berada pada rentang 1–2. Namun, keberadaan nilai yang cukup jauh dari *threshold* menunjukkan adanya kemungkinan piksel non-air yang ikut terklasifikasi sebagai badan air. Pada AWEI_{sh}, distribusi nilai badan air terlihat lebih merata dan membentuk pola yang lebih normal dibanding indeks lainnya, terutama pada tahun 2025.

3.1. Esktraksi badan air

Setelah nilai *threshold* ditentukan untuk masing-masing indeks spektral (NDWI, MNDWI, WRI, dan AWEI_{sh}), dilakukan proses ekstraksi badan air dengan memisahkan piksel yang memenuhi nilai ambang sebagai kelas air dan piksel lainnya sebagai non-air. Tahapan ini bertujuan untuk mengidentifikasi distribusi spasial badan air berdasarkan karakteristik reflektansi setiap indeks. Namun, hasil awal ekstraksi masih menunjukkan adanya piksel yang tidak merepresentasikan badan air secara aktual, terutama pada area yang tertutup awan, bayangan awan, maupun area dengan kelembapan tinggi yang memiliki respons spektral serupa (Gautam dkk 2015; Rokni dkk, 2014).



Gambar 7. Masking citra. (a) Landsat 9 OLI-2 akuisisi tanggal 29/09/2025, (b) Landsat 8 OLI akuisisi tanggal 06/08/2020 dan Landsat 5 TM akuisisi tanggal 16/10/1999

Untuk meningkatkan akurasi hasil ekstraksi, dilakukan proses *masking* untuk menghilangkan piksel yang teridentifikasi sebagai awan dan area *non-valid*, sehingga hanya piksel yang relevan yang dipertahankan. Setelah itu, dilakukan proses penajaman (*refinement*) terhadap piksel badan air untuk memperjelas batas objek dan mengurangi *noise* yang muncul pada hasil klasifikasi. Proses ini membantu meningkatkan konsistensi bentuk badan air serta memudahkan interpretasi visual.

Selain itu, area pesisir pantai dieliminasi dari hasil ekstraksi karena secara spektral memiliki karakteristik yang sangat mirip dengan badan air daratan dan berpotensi menyebabkan overestimasi luasan. Eliminasi area pesisir dilakukan agar analisis lebih terfokus pada badan air internal di wilayah penelitian, sehingga hasil yang diperoleh lebih representatif terhadap perubahan badan air yang menjadi objek kajian.

3.2. Analisis perubahan luas badan air

Nilai luas badan air per indeks sebelum voting multi indeks menunjukkan variasi yang berbeda-beda karena masing-masing indeks memiliki sensitivitas yang berbeda. Setelah diterapkan metode voting multi indeks (≥ 3 dari 4 metode), luas badan air final umumnya lebih kecil dibandingkan hasil individual masing-masing indeks, karena hanya piksel yang disetujui oleh minimal tiga indeks yang diklasifikasikan sebagai badan air. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi deteksi salah (*false positive*) dan meningkatkan akurasi ekstraksi badan air (Sun, 2024).

Tabel 3. Badan air per indeks

Indeks Spektral	Akuisis	Luas Badan air (Ha)	Persentase Badan Air (%)	Jumlah pixel badan air
NDWI	29/09/2025	12.920	1.052	143.454
	06/08/2020	5.850	0.476	64.956
	16/10/1999	0.463	0.037	5.145
MNDWI	29/09/2025	110.314	8.987	1224.843
	06/08/2020	11.925	0.971	132.415
	16/10/1999	5.459	0.444	60.623
WRI	29/09/2025	76.120	6.2016	845.188
	06/08/2020	6.792	0.553	75.419
	16/10/1999	0.880	0.071	9.776
AWEI _{sh}	29/09/2025	13.198	1.075	146.541
	06/08/2020	6.229	0.507	69.172
	16/10/1999	1.244	0.101	13.819

Hasil analisis pada Tabel 3 menunjukkan bahwa setiap indeks spektral menghasilkan estimasi luas badan air yang berbeda-beda untuk periode akuisisi yang sama. Perbedaan ini mencerminkan karakteristik sensitivitas masing-masing indeks terhadap respons spektral permukaan air. Pada akuisisi tanggal 29/09/2025, indeks MNDWI menghasilkan estimasi luas badan air terbesar, yakni 110,314 ha (8,987%) dengan 1.224.843 piksel, jauh melampaui estimasi NDWI sebesar 12,920 ha (1,052%), WRI sebesar 76,120 ha (6,2016%), dan AWEI_{sh} sebesar 13,198 ha (1,075%). Pola serupa juga ditemukan pada dua periode akuisisi lainnya, di mana MNDWI secara konsisten menghasilkan estimasi luas yang paling besar dibandingkan ketiga indeks lainnya.

Tingginya estimasi luas badan air oleh MNDWI disebabkan oleh penggunaan band *Short-Wave Infrared* (SWIR), sehingga MNDWI lebih sensitif dalam meningkatkan kontras antara air dan daratan, termasuk area lembab, tambak, dan sedimen basah yang secara spektral menyerupai air (Xu, 2006). Kondisi ini berpotensi menyebabkan *overestimasi* luas badan air apabila digunakan secara tunggal, terutama di wilayah pesisir seperti Torobulu yang memiliki karakteristik spektral kompleks akibat keberadaan vegetasi mangrove, tambak, dan area pasang surut. Hasil overlay MNDWI menunjukkan masih terdapat hasil klasifikasi yang tidak sesuai terutama pada daerah vegetasi air dan terjadi overestimasi terhadap luas area tergenang, yang merupakan keterbatasan metode MNDWI dalam membedakan air dari objek lain yang memiliki karakteristik spektral serupa.

Sebaliknya, indeks NDWI dan AWEI_{sh} cenderung menghasilkan estimasi luas yang lebih konservatif. Hal ini disebabkan NDWI berbasis band NIR yang kurang mampu menekan noise dari lahan terbangun dan sedimen (McFeeters, 1996), sedangkan AWEI_{sh} dirancang khusus untuk

mengeliminasi area bayangan dan permukaan gelap yang bukan air, sehingga menghasilkan deteksi yang lebih selektif (Feyisa dkk., 2014). WRI berada di posisi menengah karena menggunakan rasio empat band sekaligus, memberikan sensitivitas yang lebih seimbang terhadap variasi kondisi permukaan air.

Tren penurunan luas badan air dari tahun ke tahun juga terlihat jelas pada Tabel 3. Pada semua indeks, luas badan air tahun 2025 secara konsisten lebih besar dibandingkan tahun 2020, yang pada gilirannya lebih besar dibandingkan tahun 1999. Pada indeks NDWI misalnya, luas badan air meningkat dari 0,463 ha (1999) menjadi 5,850 ha (2020) dan mencapai 12,920 ha (2025). Peningkatan serupa terjadi pada ketiga indeks lainnya. Pola peningkatan luas badan air ini mengindikasikan adanya perluasan wilayah genangan air secara temporal di kawasan Torobulu selama periode pengamatan 26 tahun (1999–2025), yang dapat dikaitkan dengan faktor-faktor seperti perubahan tata guna lahan, perluasan tambak, dinamika pasang surut, maupun dampak perubahan iklim yang memengaruhi ketersediaan air permukaan di wilayah pesisir.

Merujuk pada Tabel 4, hasil ekstraksi badan air menggunakan metode voting multi indeks (≥ 3 dari 4 metode) menghasilkan luas badan air final sebesar 14,965 ha (1,219%) dengan 166.164 piksel untuk akuisisi tahun 2025, 5,953 ha (0,485%) dengan 66.101 piksel untuk tahun 2020, dan 0,641 ha (0,052%) dengan 7.121 piksel untuk tahun 1999. Nilai luas badan air final ini secara umum lebih kecil dibandingkan estimasi individual MNDWI dan WRI, namun lebih besar dari estimasi NDWI dan AWEI_{sh} secara individual. Hal ini membuktikan bahwa metode voting multi indeks berfungsi sebagai mekanisme penyaring (*filter*) yang efektif, di mana piksel yang hanya terdeteksi oleh satu atau dua indeks — yang kemungkinan besar merupakan *false positive* akibat noise bayangan, area lembab, atau sedimen basah dieliminasi dari hasil akhir.

Tabel 4. Final hasil ekstraksi badan air final voting multi indeks (3 dari 4 metode menyatakan badan air)

Sensor	Akuisis	Luas Badan air (Ha)	Persentase Badan Air (%)	Jumlah pixel badan air
Landsat 9 OLI-2	29/09/2025	14.965	1.219	166.164
Landsat 8 OLI	06/08/2020	5.953	0.485	66.101
Landsat 5 TM	16/10/1999	0.641	0.052	7.121

3.3 Hubungan antara Indeks spektral

Indeks MNDWI menunjukkan nilai mean yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan NDWI pada ketiga periode, yakni 0,4633 (1999), 0,3612 (2020), dan 0,3467 (2025). Hal ini disebabkan oleh penggunaan band SWIR yang menggantikan band NIR, sehingga MNDWI lebih sensitif dalam merespons permukaan lembab, sedimen basah, dan area peralihan antara daratan dan air di zona pesisir (Xu, 2006). Standar deviasi MNDWI yang relatif lebih kecil dibandingkan WRI menunjukkan distribusi nilai yang lebih terpusat, mengindikasikan konsistensi respons spektral indeks ini terhadap kondisi permukaan di wilayah kajian.

Indeks WRI menunjukkan karakteristik yang paling menonjol dibandingkan indeks lainnya, dengan nilai maksimum yang sangat tinggi, yakni 8,8456 (2025), 15,777 (2020), dan 3,4891 (1999). Nilai-nilai ekstrem ini mencerminkan kondisi di mana nilai penyebut (NIR + SWIR1) mendekati nol, yang terjadi pada piksel badan air dalam yang memiliki serapan sangat tinggi pada kedua band tersebut. Akibatnya, standar deviasi WRI jauh lebih besar dibandingkan ketiga indeks lainnya, sehingga interpretasi nilai statistik WRI perlu dilakukan dengan lebih hati-hati. Meskipun demikian, nilai mean dan median WRI yang berada di kisaran 1,0–1,7 mengindikasikan bahwa sebagian besar piksel di wilayah kajian berada pada zona transisi antara daratan (WRI < 1) dan air (WRI > 1), yang sesuai dengan karakteristik kawasan pesisir Torobulu.

Indeks AWEI_{sh} menunjukkan nilai mean yang paling rendah di antara keempat indeks, berkisar antara 0,0469 (2020) hingga 0,1178 (1999) dan 0,0644 (2025), dengan standar deviasi yang paling kecil yakni 0,0840–0,1021. Hal ini mengkonfirmasi bahwa AWEI_{sh} dirancang untuk menghasilkan distribusi nilai yang lebih kompak dengan memisahkan piksel air dari non-air secara lebih tegas melalui stabilisasi *threshold* pada nilai nol (Feyisa dkk., 2014). Nilai standar deviasi yang kecil

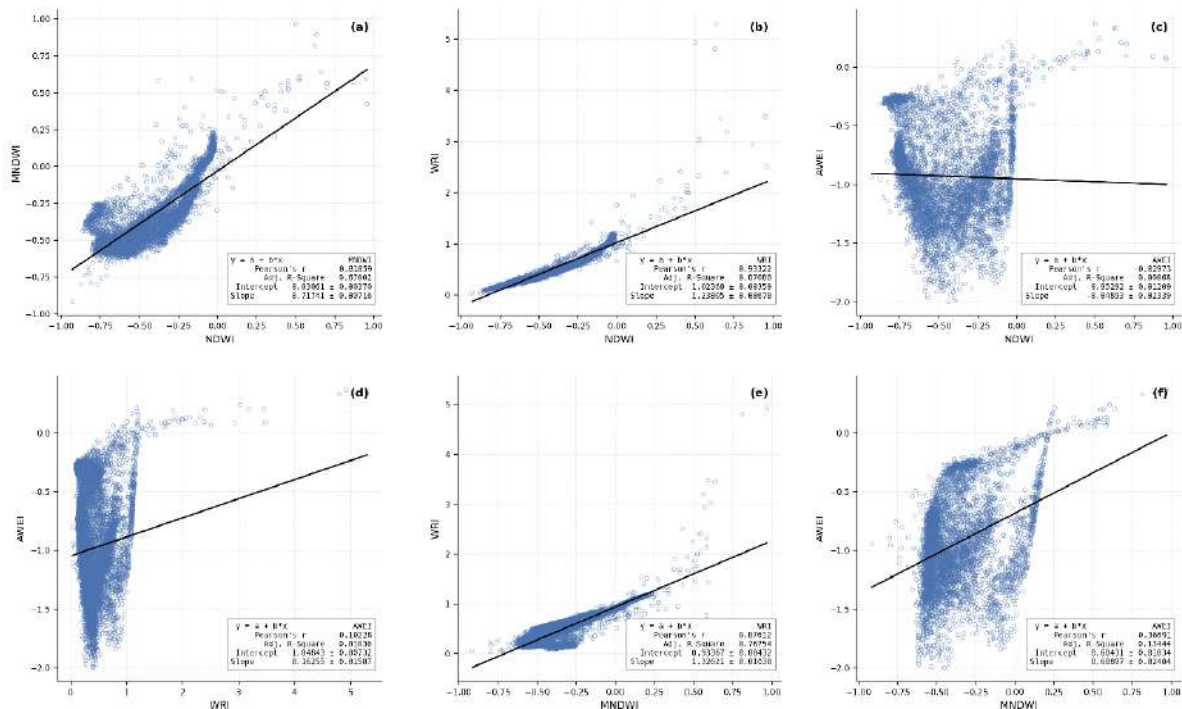
menunjukkan rendahnya variabilitas nilai $AWEI_{sh}$ di seluruh wilayah ROI, yang berarti indeks ini mampu mempertahankan konsistensi nilai meskipun terdapat keragaman kondisi permukaan di kawasan pesisir.

Tabel 5. Statistik NDWI, MNDWI, WRI dan $AWEI_{sh}$ dari data Citra Landsat 5, Landsat 8 dan Landsat 9

Indeks Spektral	Akuisis	Min	Max	Mean	Median	Std Dev
NDWI	29/09/2025	-0.2128	0.9593	0.2346	0.1833	0.2799
	06/08/2020	-0.2745	0.9951	0.1449	0.1214	0.2968
	16/10/1999	-0.1783	0.4811	0.0788	0.0927	0.2021
MNDWI	29/09/2025	0.0186	0.9665	0.3467	0.2826	0.1953
	06/08/2020	0.0078	0.8750	0.3612	0.3615	0.2192
	16/10/1999	0.2339	0.7916	0.4633	0.4835	0.1642
WRI	29/09/2025	1.0023	8.8456	1.7111	1.3930	1.0973
	06/08/2020	1.0095	15.777	1.715	1.4069	2.0534
	16/10/1999	1.0391	3.4891	1.6985	1.7527	0.6869
$AWEI_{sh}$	29/09/2025	-0.2212	0.3667	0.0644	0.0801	0.1021
	06/08/2020	-0.2485	0.3699	0.0469	0.0558	0.1089
	16/10/1999	0.0066	0.2922	0.1178	0.1029	0.0840

Analisis korelasi *Pearson* antar indeks spektral (Gambar 8) menunjukkan kekuatan hubungan yang bervariasi antar indeks. MNDWI dan NDWI (Gambar 8a) berkorelasi kuat ($r = 0,8186$; Adj. $R^2 = 0,6700$) karena kedua indeks berbagi band *Green* sebagai pembilang, hanya berbeda pada band penyebut (NIR pada NDWI, SWIR1 pada MNDWI). WRI dan NDWI (Gambar 8b) berkorelasi sangat kuat ($r = 0,9332$; Adj. $R^2 = 0,8707$), tertinggi di antara seluruh pasangan, karena keduanya sama-sama dipengaruhi kontras *Green*–NIR meski struktur formulanya berbeda (rasio empat band dan selisih ternormalisasi dua band). Sebaliknya, $AWEI_{sh}$ dan NDWI (Gambar 8c) berkorelasi sangat lemah dan tidak signifikan ($r = -0,0297$; Adj. $R^2 = 0,0007$), demikian pula $AWEI_{sh}$ dan WRI (Gambar 8d) yang mendekati nol ($r = 0,1023$; Adj. $R^2 = 0,0104$); lemahnya hubungan ini terjadi karena $AWEI_{sh}$ menggunakan kombinasi lima band (termasuk *Blue* dan SWIR2) yang dirancang khusus untuk menekan bayangan, sehingga responsnya tidak sejalan dengan indeks lain yang berbasis kontras *Green*–NIR. WRI dan MNDWI (Gambar 8e) berkorelasi kuat ($r = 0,8761$; Adj. $R^2 = 0,7675$) karena keduanya sama-sama memanfaatkan band SWIR1 dalam formulanya, sedangkan $AWEI_{sh}$ dan MNDWI (Gambar 8f) hanya berkorelasi sedang ($r = 0,3669$; Adj. $R^2 = 0,1344$) karena band tambahan pada $AWEI_{sh}$ membuat sensitivitasnya tidak sepenuhnya sejalan dengan MNDWI.

Secara umum, $AWEI_{sh}$ konsisten menunjukkan korelasi paling lemah terhadap ketiga indeks lainnya ($r = 0,10$ – $0,37$) akibat perbedaan struktur band yang cukup besar, terutama karena $AWEI_{sh}$ melibatkan band *Blue* dan SWIR2 yang tidak digunakan oleh indeks lain serta dirancang khusus untuk menekan pengaruh bayangan. Sebaliknya, NDWI, MNDWI, dan WRI saling berkorelasi kuat hingga sangat kuat ($r = 0,82$ – $0,93$) karena sama-sama bertumpu pada kontras band *Green* terhadap band inframerah (NIR maupun SWIR1), sehingga ketiganya cenderung merespons gradien spektral air–daratan dengan pola yang serupa. Variasi kekuatan hubungan ini menegaskan bahwa keempat indeks tidak sepenuhnya redundan satu sama lain, melainkan saling melengkapi dalam menangkap karakteristik spektral badan air pada kondisi permukaan yang berbeda-beda. $AWEI_{sh}$, misalnya, mampu mengoreksi area yang salah klasifikasi akibat bayangan pada NDWI, MNDWI, dan WRI, sementara ketiga indeks tersebut dapat saling memvalidasi pada area air terbuka yang lebih homogen. Oleh karena itu, pendekatan voting multi-indeks (≥ 3 dari 4 metode) tepat digunakan untuk meningkatkan keandalan ekstraksi badan air, karena kesalahan klasifikasi pada satu indeks dapat dikoreksi oleh kesepakatan indeks-indeks lainnya, sehingga hasil akhir menjadi lebih *robust* dibandingkan penggunaan indeks tunggal (Guo dkk., 2023; Ma dkk., 2023; Sun, 2024).



Gambar 8. Hubungan antara Indeks spektral. (a) MNDWI vs NDWI, (b) WRI vs NDWI, (c) AWEI_{sh} vs NDWI, (d) AWEI_{sh} vs WRI, (e) WRI vs MNDWI dan (f) AWEI_{sh} vs MNDWI

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil melakukan ekstraksi dan pemantauan spasial-temporal badan air di kawasan Torobulu menggunakan indeks NDWI, MNDWI, WRI, dan AWEI_{sh} pada citra Landsat tahun 1999, 2020, dan 2025. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan luas badan air yang signifikan, dari 0,641 ha (0,052%) pada tahun 1999 menjadi 5,953 ha (0,485%) pada tahun 2020 dan 14,965 ha (1,219%) pada tahun 2025. Peningkatan lebih dari 23 kali lipat ini mengindikasikan perubahan tutupan lahan yang cukup besar selama periode pengamatan. Setiap indeks menghasilkan estimasi luas badan air yang berbeda sesuai sensitivitas spektralnya, dengan MNDWI cenderung memberikan luas terbesar dan AWEI_{sh} paling selektif. Pendekatan voting multi indeks (≥ 3 dari 4 indeks) terbukti efektif dalam mengintegrasikan keunggulan masing-masing indeks sehingga menghasilkan peta badan air yang lebih representatif.

Analisis korelasi Pearson menunjukkan variasi hubungan antarindeks, mulai dari yang sangat lemah hingga sangat kuat. Korelasi terkuat ditemukan pada pasangan WRI dan NDWI ($r = 0,9332$; $\text{Adj. } R^2 = 0,8707$), diikuti oleh WRI dan MNDWI ($r = 0,8761$; $\text{Adj. } R^2 = 0,7675$) serta MNDWI dan NDWI ($r = 0,8186$; $\text{Adj. } R^2 = 0,6700$). Sebaliknya, AWEI_{sh} menunjukkan korelasi yang lemah hingga sangat lemah dengan ketiga indeks lainnya, yaitu terhadap MNDWI ($r = 0,3669$), WRI ($r = 0,1023$), dan NDWI ($r = -0,0297$). Hasil ini menegaskan bahwa keempat indeks memberikan informasi yang saling melengkapi dan tidak sepenuhnya tidak berlebihan, sehingga pendekatan voting multi indeks lebih andal dibandingkan penggunaan indeks tunggal untuk ekstraksi badan air di kawasan pesisir yang kompleks.

Referensi

- Fang-fang, Z., Bing, Z., Jun-sheng, L., Qian, S., Yuanfeng, W., & Yang, S, 2011. *Comparative analysis of automatic water identification method based on multispectral remote sensing*. Procedia Environ. Sci. 11, 1482–1487. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.223>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R, 2014. *Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery*. Remote Sensing of Environment, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>

-
- Gautam, V. K., Gaurav, P. K., Murugan, P., & Annadurai, M, 2015. *Assessment of Surface Water Dynamics in Bangalore Using WRI, NDWI, MNDWI, Supervised Classification and K-T Transformation*. Aquatic Procedia, 4, 739–746. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.095>
- Guo, J., Wang, X., Liu, B., Liu, K., Zhang, Y., Wang, C, 2023. *Remote-Sensing Extraction of Small Water Bodies on the Loess Plateau*. Water 2023, 15, 866. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2251704>
- Laonamsai, J., Julphunthong, P., Saprathet, T., Kimmany, B., Ganchanasuragit, T., Chomcheawchan, P., & Tomun, N, 2023. *Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand*. Hydrology, 10 (70). <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>
- Ma, D., Jiang, L., Li, J., & Shi, Y, 2023. *Water index and Swin Transformer Ensemble (WISTE) for water body extraction from multispectral remote sensing images*. GIScience & Remote Sensing, 60(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2251704>
- Mcfeeters, S. K, 1996. *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S, 2014. *Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery*. Remote Sensing, 6(5), 4173-4189. <https://doi.org/10.3390/rs6054173>
- Shen, L & Li, C, 2010. *Water Body Extraction from Landsat ETM+ Imagery Using Adaboost Algorithm*. In Proceedings of 18th International Conference on Geoinformatics, 18–20 June 2010, Beijing, China; pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567762>
- Sun, Q., Li, J, 2024. *A method for extracting small water bodies based on DEM and remote sensing images*. Sci Rep 14, 760. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51346-7>
- Xu, H., 2006. *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*. International Journal of Remote Sensing, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
-