

**[Research Article]**

## Deteksi Tumpahan Minyak Menggunakan Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar dan Adaptive Threshold di Perairan Lhokseumawe

Alvin Anugrah Putra\*, Dela Oktaviani, Rizqia Rahmah Nurul Syifa<sup>ID</sup>,  
Silmi Afina Aliyan<sup>ID</sup>, Achmad Fadhilah<sup>ID</sup>

Program Studi Sains Informasi Geografi, Universitas Pendidikan Indonesia, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

\*Correspondence: [alvinanugrahputra18@upi.edu](mailto:alvinanugrahputra18@upi.edu)

<b>Informasi Artikel:</b>	<b>Abstrak</b>
<p><i>Diterima:</i> 19 April 2026</p> <p><i>Disetujui:</i> 21 Mei 2026</p> <p><i>Dipublikasi:</i> 2 Juni 2026</p>	<p><i>Tumpahan minyak merupakan salah satu bentuk pencemaran laut yang berdampak serius terhadap ekosistem pesisir dan aktivitas manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi dan menganalisis persebaran tumpahan minyak di perairan Lhokseumawe menggunakan citra Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar (SAR) dengan perangkat lunak SNAP. Data yang digunakan berupa citra Sentinel-1A dengan mode Interferometric Wide Swath dan polarisasi VV yang direkam pada 24 April 2022. Deteksi tumpahan minyak dilakukan menggunakan metode adaptive threshold melalui Oil Spill Detection Tool. Tumpahan minyak teridentifikasi sebagai area gelap dengan nilai hamburan balik rendah yang membentuk pola memanjang dan terfragmentasi mengikuti pengaruh arus dan angin. Variasi nilai threshold shift menghasilkan estimasi luas tumpahan minyak yang berbeda, yaitu sebesar 36,86 km<sup>2</sup> pada threshold 1,0 dB, 12,82 km<sup>2</sup> pada threshold 2,0 dB, dan 4,61 km<sup>2</sup> pada threshold 3,0 dB. Meskipun terdapat potensi kesalahan deteksi akibat fenomena laut lain, penelitian ini menunjukkan bahwa citra Sentinel-1A SAR efektif digunakan untuk pemantauan tumpahan minyak di wilayah pesisir.</i></p>
<p><b>Kata kunci:</b> <i>tumpahan minyak; Sentinel-1A SAR; wilayah pesisir.</i></p>	
<b>Article Info:</b>	<b>Abstract</b>
<p><i>Received:</i> 19 April 2026</p> <p><i>Accepted:</i> 21 May 2026</p> <p><i>Published:</i> 2 June 2026</p>	<p><i>Oil spills represent a major form of marine pollution that poses serious threats to coastal ecosystems and human activities. This study aims to detect and analyse the spatial distribution of the oil spill in Lhokseumawe waters using Sentinel-1A Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery with software SNAP. The dataset used consists of Sentinel-1A SAR imagery acquired on 24 April 2022 with Interferometric Wide Swath mode and VV polarisation. Oil spill detection was performed using an adaptive thresholding approach through the Oil Spill Detection Tool. The oil spill was identified as a dark area with low backscatter values forming elongated and fragmented patterns influenced by ocean currents and wind conditions. Variations in the threshold shift values produced different estimated extents of the oil spill, namely 36.86 km<sup>2</sup> at the 1.0 dB threshold, 12.82 km<sup>2</sup> at the 2.0 dB threshold, and 4.61 km<sup>2</sup> at the 3.0 dB threshold. Although potential false detections may occur due to look-alike phenomena, this study demonstrates that Sentinel-1A SAR imagery is effective for monitoring oil spills in coastal waters.</i></p>
<p><b>Keywords:</b> <i>oil spill; Sentinel-1A SAR; coastal waters.</i></p>	

## PENDAHULUAN

Kasus tumpahan minyak beberapa kali terjadi di perairan Indonesia seperti di Balikpapan pada tahun 2018, Riau pada tahun 2024, dan Aceh pada tahun 2022. Tumpahan minyak merupakan kejadian minyak yang bocor ke daratan atau perairan dari tangki minyak sebuah kapal tanker (Astuti & Titah, 2021). Tumpahan minyak menyebabkan pencemaran yang mengancam kehidupan ekosistem pesisir dan manusia. Material minyak yang tumpah di perairan sulit dihilangkan karena sifat minyak yang tidak mudah menguap. Jika terus dibiarkan, maka akan berdampak pada kerusakan biota laut, iritasi, dan gangguan sistem pernapasan (Annisa dkk., 2024). Penyebab tumpahan minyak dapat disebabkan dari pipa minyak yang bocor, kegiatan bunker yang tidak sesuai prosedur, atau tangki minyak pada kapal yang mengalami kebocoran (Saifudin dkk., 2020; BBC News, 2018).

Kejadian tumpahan minyak pernah terjadi di sekitar perairan Lhokseumawe, Aceh, pada 24 April 2022. Kejadian di Aceh terjadi karena pada kapal yang membawa bahan bakar minyak terdapat katup pipa yang bocor (Asmunda, 2022). Kasus pencemaran ini langsung ditangani oleh pihak yang terlibat, yakni PT Pertamina Patra Niaga Regional Sumbagut. Untuk mengatasi hal tersebut, pihak yang terlibat langsung memasang *oil boom*, yakni sejenis alat untuk membatasi minyak di perairan agar tidak menyebar lebih luas. Tidak hanya itu, dilakukan juga penanganan untuk menetralkan rembesan minyak menggunakan *Oil Spill Dispersant* (OSD).

Secara spasial, tumpahan minyak yang terjadi menunjukkan pola sebaran di perairan sekitar Lhokseumawe. Minyak yang mengapung di permukaan laut menyebar mengikuti arah dan kecepatan angin serta arus laut, sehingga luas area terdampak dapat berubah dalam waktu singkat. Pergerakan massa minyak ini berisiko menjangkau zona pesisir, area tangkap nelayan, dan perairan dangkal. Oleh karena itu, meskipun secara administratif kasus dinyatakan selesai, analisis spasial terhadap persebaran serta pemetaan wilayah terdampak tetap penting untuk mengidentifikasi dampak lanjutan.

Salah satu kemampuan citra penginderaan jauh adalah membedakan material yang memiliki warna dan ciri spektral yang berbeda. Tumpahan minyak biasanya memiliki warna

hitam pekat dan kontras dengan warna air laut. Perbedaan material dapat dilihat dari intensitas hamburan balik (*backscatter*). Hamburan balik di laut didominasi oleh gelombang kapiler pada permukaan air. Intensitas hamburan balik sangat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan laut yang dikontrol oleh angin. Minyak bersifat meredam gelombang kapiler sehingga menurunkan hamburan balik dan menghasilkan *dark spot* pada citra.

Citra satelit yang digunakan dari penginderaan jauh ini adalah Sentinel-1A *Synthetic Aperture Radar* (SAR) dengan polarisasi VV karena memiliki tingkat sinyal tersebar balik permukaan laut yang lebih baik, sehingga sesuai untuk mendeteksi tumpahan minyak (Jafarzadeh dkk., 2021). Teknologi ini merupakan sistem penginderaan jauh aktif yang dapat melengkapi kekurangan analisis dari sistem penginderaan jauh pasif. Pemanfaatan teknologi radar kini membantu banyak hal di segala aspek. Kelebihan penginderaan jauh radar adalah merekam tanpa melihat siang malam dan tidak bergantung pada cuaca (Xiong & Butler, 2017).

Sentinel 1-A SAR banyak digunakan untuk pemantauan *oil spill* di perairan. Ketika SAR memantulkan gelombang, minyak meredam gelombang balik sehingga pantulan lebih lemah, menampilkan warna gelap pada citra (Topouzelis, 2008). Namun, area gelap bukan berarti tumpahan minyak karena bisa saja mengindikasikan zat biogenik, jejak kapal, zona upwelling, daerah rendah angin, dan curah hujan (Topouzelis, 2008; Lentini dkk., 2022), sehingga dalam analisisnya diperlukan kecocokan tanggal kejadian *oil spill* agar lebih akurat. Selain SAR, penelitian ini juga menambahkan perhitungan kecepatan angin untuk memastikan bahwa kondisi perekaman satelit berada dalam kondisi angin ideal untuk mendeteksi tumpahan minyak.

Penelitian terdahulu telah menggunakan citra SAR untuk mendeteksi tumpahan minyak. Penelitian Prastyani & Basith (2019) menggunakan Sentinel-1A untuk analisis tumpahan minyak dan melakukan validasi visual menggunakan citra MODIS. Penelitian Damayanti dkk. (2022) mendeteksi persebaran tumpahan minyak menggunakan Sentinel-1A dengan tambahan data *trajectory* angin.

Berbagai studi telah membuktikan efektivitas citra Sentinel-1A SAR dalam mendeteksi tumpahan minyak di permukaan

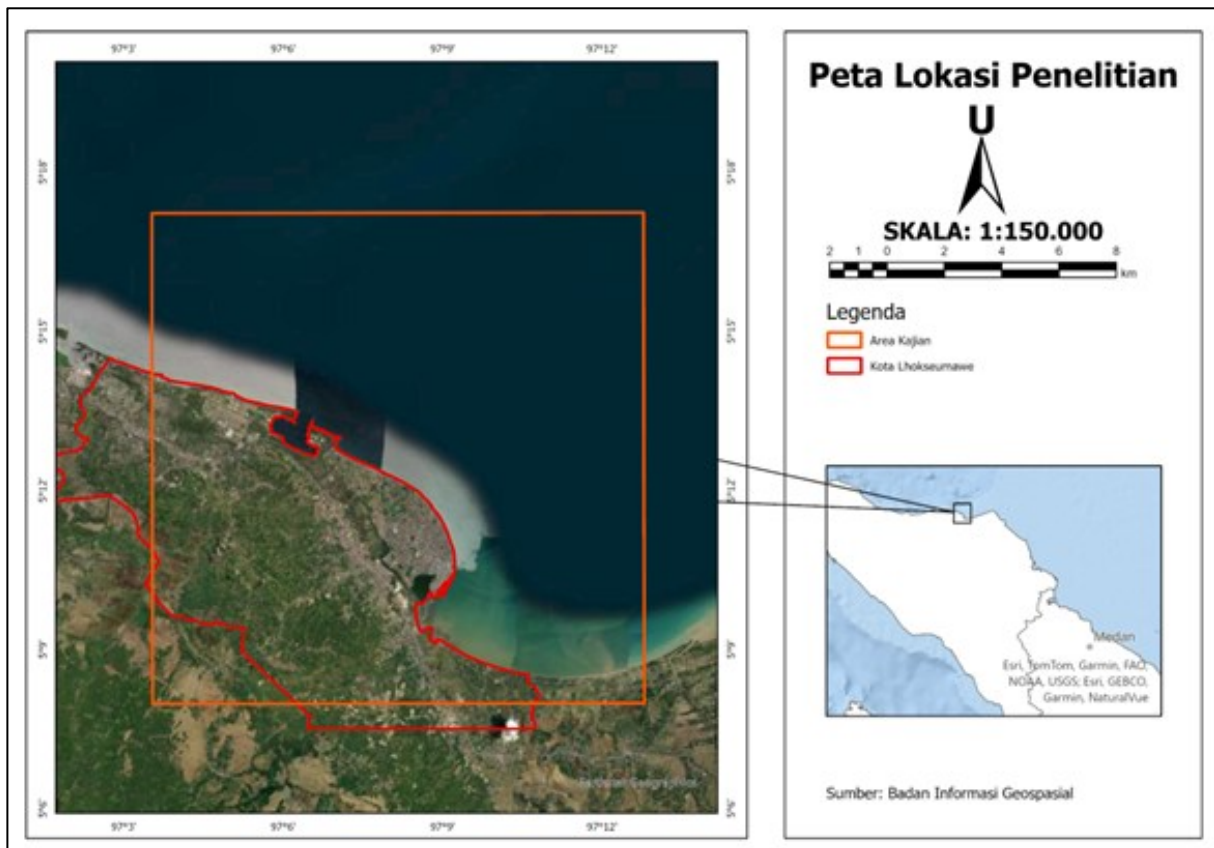
laut. Namun, sebagian besar studi tersebut masih fokus pada hasil akhir deteksi tanpa membahas pengaruh variasi parameter *threshold* terhadap pola, fragmentasi, dan luasan yang teridentifikasi.

Penggunaan citra Sentinel-1A juga memiliki keterbatasan temporal, karena tidak selalu tersedia tepat pada tanggal dan waktu kejadian tumpahan minyak. Hal ini disebabkan oleh jadwal perekaman satelit (*revisit time*) serta cakupan lintasan (*orbit pass*) yang tidak selalu bertepatan dengan lokasi dan waktu kejadian. Selain itu, kajian pada wilayah pesisir berskala lokal seperti perairan Lhokseumawe yang memiliki dinamika arus dan aktivitas pelayaran yang kompleks masih relatif terbatas. Keterbatasan lainnya adalah minimnya pembahasan visual mengenai kesalahan deteksi akibat fenomena laut lain yang menyerupai tumpahan minyak. Penelitian ini berupaya mengisi *research gap* tersebut melalui analisis perbandingan beberapa nilai *threshold* pada citra Sentinel-1A SAR pada perangkat lunak SNAP menggunakan *Oil Spill Detection* serta interpretasi hasil deteksi yang dikaitkan dengan kondisi kejadian aktual.

## METODE

Penelitian ini dilakukan di perairan Lhokseumawe, Provinsi Aceh, yang terletak di pesisir utara Pulau Sumatra dan berbatasan langsung dengan Selat Malaka. Area kajian berfokus pada wilayah perairan terdampak tumpahan minyak yang berada di sekitar koordinat  $5^{\circ}12'36''$  LU dan  $97^{\circ}8'10''$  BT. Wilayah ini merupakan kawasan pesisir yang memiliki aktivitas pelabuhan dan jalur pelayaran yang cukup padat sehingga rentan terhadap kejadian pencemaran laut khususnya tumpahan minyak. Waktu penelitian disesuaikan dengan kejadian aktual yang terjadi pada 24 April 2022. Lokasi penelitian dan area kajian tumpahan minyak di perairan Lhokseumawe ditunjukkan pada Gambar 1.

Data utama dalam penelitian ini adalah citra satelit Sentinel-1A SAR produk GRD mode akuisisi *Interferometric Wide Swath* (IW) orbit pass ascending dan polarisasi VV yang direkam pada 24 April 2022. Sebagai data pendukung, digunakan data The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) untuk melihat kecepatan angin (Hersbach dkk., 2023). Serta data pendukung



Gambar 1. Lokasi Penelitian

lainnya adalah informasi kejadian tumpahan minyak yang diperoleh dari laporan media dan instansi terkait. Data ini berfungsi sebagai acuan temporal dan spasial dalam proses interpretasi citra, sehingga area gelap yang terdeteksi pada citra SAR dapat dikaitkan dengan kejadian tumpahan minyak dan bukan fenomena laut lainnya.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis penginderaan jauh berbasis radar SAR untuk mendeteksi dan memetakan tumpahan minyak di permukaan perairan. Prinsip dasar metode ini adalah perbedaan nilai hamburan balik (*backscatter*) antara perairan yang tertutup minyak dan perairan normal. Lapisan minyak di permukaan laut menyebabkan peredaman gelombang kapiler, sehingga energi gelombang balik yang diterima sensor SAR menjadi lebih rendah dan muncul sebagai area berwarna gelap pada citra.

Prinsip metode yang digunakan adalah melakukan komparasi 3 ukuran *threshold* (dB) berbeda, yaitu *Threshold 1* sebesar 1,0 dB, *Threshold 2* sebesar 2,0 dB, dan *Threshold 3* sebesar 3,0 dB untuk melihat visualisasi indikasi tumpahan minyak. Selain itu, parameter *Background Window Dimension* pada tool *Oil Spill Detection* di SNAP sebesar 4,5 km. Pendekatan *adaptive threshold* pada penelitian dilakukan penyesuaian kembali nilai *threshold* secara bertahap untuk penyesuaian karakteristik *backscatter* citra SAR agar menonjolkan hasil indikasi tumpahan minyak. Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak *Sentinel Application Platform* (SNAP).

Tahapan analisis meliputi pra-pengolahan citra radar, peningkatan kualitas citra, koreksi geometrik, serta deteksi tumpahan minyak menggunakan metode *thresholding* melalui *Oil Spill Detection Tool*. Proses diawali dengan melakukan subset citra untuk memfokuskan area analisis berdasarkan wilayah penelitian (*Area of Interest/AOI*). Selanjutnya, dilakukan *speckle filtering* guna mengurangi efek *salt-and-pepper* pada citra sehingga tampilan citra menjadi lebih halus dan objek tumpahan minyak lebih mudah diidentifikasi. Tahap berikutnya adalah *calibration* untuk mengubah nilai *Digital Number* (DN) menjadi nilai koefisien hamburan balik *sigma naught* ( $\sigma^0$ ) dalam satuan desibel (dB), sehingga karakteristik permukaan laut dan area yang terindikasi tumpahan minyak dapat dibedakan secara jelas berdasarkan nilai

*backscatter*. Setelah itu, dilakukan koreksi geometrik menggunakan *Average Height Range-Doppler* dengan sistem koordinat WGS 84 untuk memperbaiki posisi geometrik citra agar sesuai dengan koordinat sebenarnya di permukaan Bumi.

Proses deteksi dijalankan melalui *Oil Spill Detection Tool* menggunakan metode *adaptive thresholding* untuk mengidentifikasi area dengan nilai hamburan balik rendah (*low backscatter*) yang berpotensi sebagai tumpahan minyak. Pada penelitian ini, dilakukan komparasi parameter *threshold* sebesar 1,0 dB, 2,0 dB, dan 3,0 dB untuk menganalisis pengaruh sensitivitas *threshold* terhadap hasil deteksi *oil spill*, dengan parameter *Background Window Dimension* yang ditetapkan sebesar 4,5 km. Metode ini dipilih karena relatif sederhana dan efektif untuk mengidentifikasi area dengan nilai hamburan balik rendah yang berpotensi sebagai tumpahan minyak. Alur penelitian yang digunakan dalam proses deteksi tumpahan minyak menggunakan citra Sentinel-1A SAR ditunjukkan pada Gambar 2.

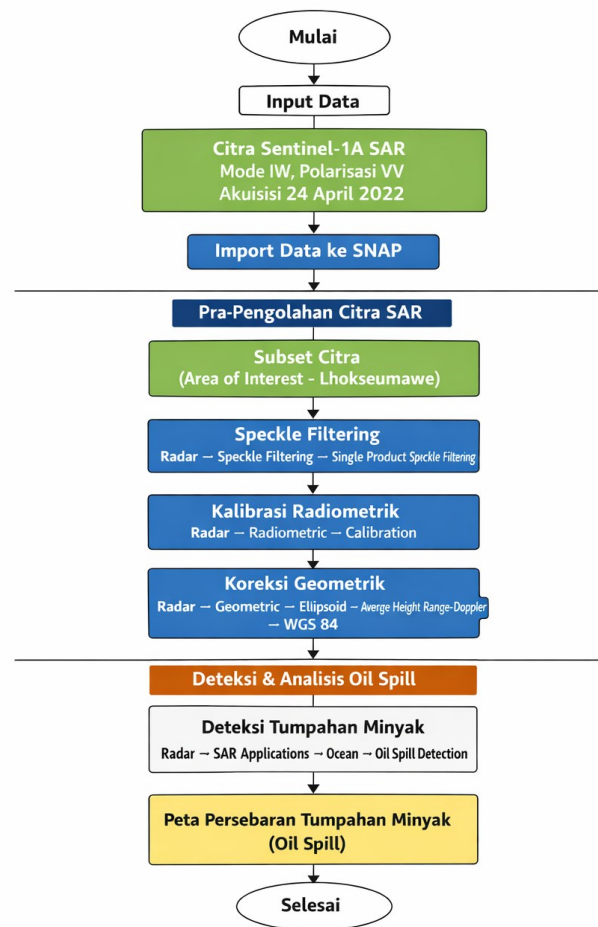
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Angin

Angin memiliki peran dalam identifikasi tumpahan minyak. Berdasarkan data ECMWF, didapatkan bahwa lokasi kajian memiliki rentang kecepatan angin 0,19–2,25 m/s. Menurut Prastyani & Basith (2019) dan Suhendi & Marsisno (2025), kecepatan angin yang sesuai untuk analisis tumpahan minyak berkisar 2–14 m/s. Dapat diinterpretasikan bahwa kecepatan angin di lokasi penelitian kala itu cukup ideal untuk melakukan analisis tumpahan minyak.

### Analisis Tekstur

Hasil analisis tekstur memperlihatkan citra *backscatter* SAR dengan polarisasi VV yang menjelaskan indikasi *oil spill* yang tampak sebagai area berwarna lebih gelap (*dark spot*) dibandingkan dengan perairan di sekitarnya (Gambar 3). Perbedaan rona ini menunjukkan adanya nilai hamburan balik (*backscatter*) yang rendah, yang umumnya berkaitan dengan perubahan kekasaran permukaan laut. Pada citra SAR, kekuatan permukaan perairan yang dibandingkan dengan sinyal yang dipantulkan dipengaruhi oleh kondisi permukaan laut. Lapisan minyak yang menutupi permukaan air laut berperan sebagai peredam gelombang



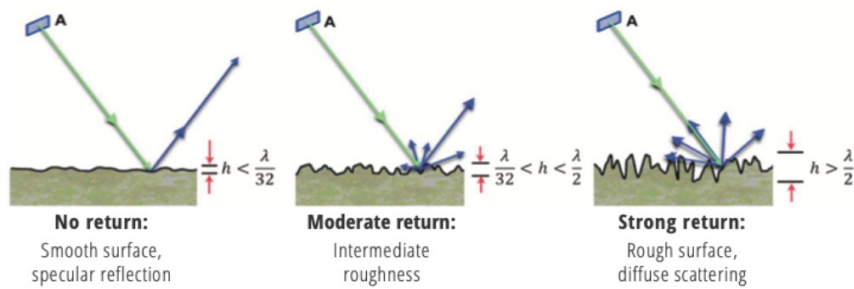
**Gambar 2.** Diagram Alir Penelitian

kapiler tersebut, sehingga mekanisme hamburan balik menjadi lemah dan hanya sedikit energi radar yang dipantulkan kembali ke sensor. Akibatnya, area yang tertutup minyak muncul sebagai zona gelap pada citra SAR. Keberadaan daratan yang tampak sangat terang pada citra

disebabkan oleh nilai *backscatter* yang tinggi akibat permukaan yang kasar. Ilustrasi mekanisme *backscatter* pada citra SAR yang menjadi dasar identifikasi fenomena *dark spot* disajikan pada Gambar 4.



**Gambar 3.** Citra Backscatter Polarisasi VV



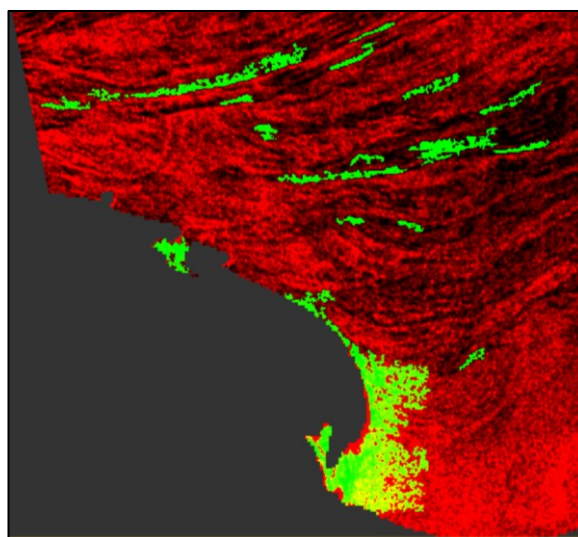
Gambar 4. Mekanisme Backscatter (Meyer, 2019)

### Adaptive Threshold

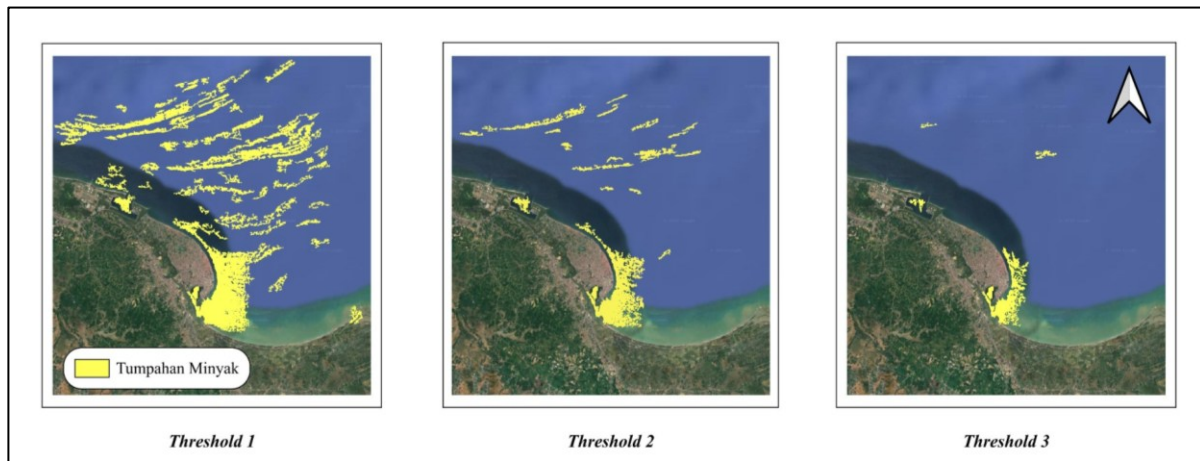
Pengolahan berikutnya menggunakan algoritma *adaptive threshold* yang tersedia pada *Oil Spill Detection Tool* di perangkat lunak SNAP. Penggunaan *adaptive threshold* diyakini memiliki kemampuan mencegah segmentasi *noise* pada citra dibandingkan dengan *global threshold* (Chen dkk., 2022). Penerapan *adaptive threshold* terlebih dahulu harus ditentukan pada ukuran *background window* untuk menghitung tingkat *backscatter* rata-rata lokal dan *threshold shift* yang ditetapkan sebesar  $k$  desibel di bawah perkiraan tingkat *backscatter* rata-rata lokal. Pada penelitian ini, parameter *background window* menggunakan ukuran 4,5 km karena area tumpahan minyak di perairan Lhokseumawe memiliki pola sebaran yang memanjang dan terfragmentasi mengikuti arus serta angin laut. Penggunaan ukuran jendela tersebut bertujuan agar perhitungan *backscatter* lokal tetap mampu merepresentasikan kondisi permukaan laut di sekitar *dark spot* tanpa terlalu dipengaruhi variasi kecil akibat arus, gelombang, maupun *noise speckle*. Ukuran

jendela yang terlalu kecil berpotensi menyebabkan variasi dinamika laut ikut tersegmentasi sebagai indikasi *oil spill*, sedangkan ukuran jendela yang terlalu besar dapat menghaluskan perbedaan kontras sehingga sebagian area tumpahan minyak sulit dibedakan dari perairan normal.

Ukuran *background window* 4,5 km dipilih untuk menjaga keseimbangan antara sensitivitas deteksi dan kemampuan algoritma dalam membedakan indikasi minyak dari variasi kondisi laut di sekitarnya. Pada kasus tumpahan minyak di Lhokseumawe yang terjadi pada 24 April 2022, sebaran tumpahan minyak relatif tidak homogen dan menyebar cukup luas mengikuti arah arus dan angin. Hasil menunjukkan bahwa *oil spill* membentuk pola linier memanjang serta terfragmentasi, terutama di perairan lepas di sebelah utara dan timur laut Lhokseumawe serta di sekitar wilayah pesisir Banda Sakti hingga Muara Dua. Hasil visualisasi *Oil Spill Detection Tool* dalam komposit RGB menunjukkan indikasi *dark spot* yang terdeteksi sebagai area potensial tumpahan minyak sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Citra RGB Oil Spill Detection



**Gambar 6.** Peta Tumpahan Minyak di Perairan Lhokseumawe

Pada penelitian ini, parameter *threshold* (dB) divariasikan menjadi tiga nilai, yaitu *Threshold 1* sebesar 1,0 dB, *Threshold 2* sebesar 2,0 dB, dan *Threshold 3* sebesar 3,0 dB. Variasi nilai tersebut digunakan untuk menganalisis pengaruh sensitivitas *threshold* terhadap hasil deteksi *oil spill*. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa terdapat perbedaan luas dan pola sebaran *oil spill* pada masing-masing ukuran *threshold*. Pada *threshold 1*, area tumpahan terlihat paling luas dengan fragmen kecil yang tersebar di laut terbuka dengan estimasi luas 36,86 km<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa nilai *threshold* yang lebih rendah membuat sistem lebih sensitif dalam mendeteksi nilai *backscatter* yang rendah. Namun, tingkat sensitivitas yang tinggi juga berpotensi meningkatkan kesalahan deteksi.

Hasil deteksi *threshold 2* menunjukkan area yang lebih selektif dibandingkan *threshold 1* dengan estimasi luas 12,82 km<sup>2</sup>. Pola linier memanjang masih yang mengikuti arah arus dan angin masih terlihat jelas, tapi jumlah fragmen kecil mulai berkurang. Sementara itu pada *threshold 3*, area yang terdeteksi menjadi paling sedikit dan hanya mencakup bagian dengan nilai *backscatter* paling rendah yang estimasi luasnya 4,61 km<sup>2</sup>. Fragmen-fragmen

kecil hampir tidak terlihat dan hasil tampak lebih bersih dan minim gangguan. Namun, penggunaan *threshold* yang terlalu tinggi juga berpotensi menyebabkan *under detection*, yaitu tidak terdeteksinya bagian tumpahan yang tipis atau dengan kontras rendah. Secara keseluruhan, *threshold 2* cenderung memberikan hasil yang paling seimbang dalam merepresentasikan persebaran *oil spill*. Perbandingan hasil deteksi tumpahan minyak berdasarkan variasi nilai *threshold shift* lebih jelas disajikan pada Tabel 1 berikut ini.

Meskipun secara umum deteksi menunjukkan hasil yang baik, pada algoritma ini tetap terdapat potensi kesalahan deteksi di tengah laut yang dapat berasal dari fenomena biogenik atau aktivitas kapal. Contoh kesalahan deteksi pada citra SAR akibat fenomena laut lain ditunjukkan pada Gambar 7. Fenomena biogenik, seperti keberadaan surfaktan alami, akumulasi fitoplankton, atau proses biologis di permukaan laut, dapat menurunkan kekasaran permukaan air sehingga meredam gelombang kapiler dan menghasilkan nilai *backscatter* rendah yang mirip dengan karakteristik tumpahan minyak (Marghany, 2014). Selain itu, aktivitas kapal juga berpotensi menimbulkan kesalahan deteksi karena kontras *backscatter* yang tinggi, gangguan

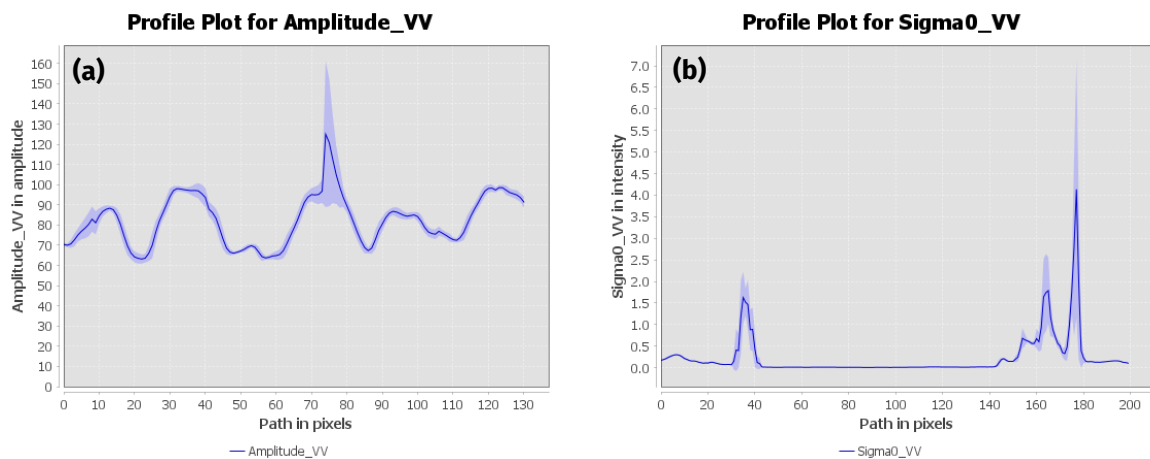
**Tabel 1.** Perbandingan Hasil Deteksi Oil Spill Berdasarkan Variasi Threshold

Skenario	Threshold Shift (k)	Background Window Size	Estimasi Luas (km <sup>2</sup> )	Karakteristik Visual
Threshold 1	1,0 dB	4,5 km	36,86	Area deteksi paling luas, banyak fragmen kecil, sensitivitas tinggi.
Threshold 2	2,0 dB	4,5 km	12,82	Pola sebaran lebih selektif, bentuk linier masih jelas, fragmen mulai berkurang.
Threshold 3	3,0 dB	4,5 km	4,61	Area deteksi paling sedikit, hasil lebih bersih, minim gangguan.

Sumber: Hasil Analisis Data Primer, 2026.



Gambar 7. Kesalahan Deteksi Pada Citra



Gambar 8. Nilai Backscatter, (a) Nilai Backscatter Disekitar Kesalahan Deteksi, dan (b) Nilai Backscatter Tumpahan Minyak

hidrodinamika atau pelepasan residu minyak dalam jumlah kecil di lintasan kapal dapat membentuk dark spot (Marghany, 2014). Hal ini disebabkan karena algoritma *adaptive threshold* hanya mempertimbangkan perbedaan nilai *backscatter* secara lokal. Perbedaan karakteristik nilai *backscatter* antara area kesalahan deteksi dan area tumpahan minyak ditunjukkan pada Gambar 8.

Tumpahan minyak yang terdeteksi pada citra SAR merupakan insiden yang terjadi pada 24 April 2022 akibat kebocoran pada kapal pengangkut bahan bakar minyak jenis biosolar yang sedang bersandar di Pelabuhan Depot Pertamina. Berdasarkan laporan media, kebocoran tersebut terjadi pada bagian lambung kapal MT Aerosea Catalina, diduga akibat katup pipa pengisian yang tidak bekerja secara optimal sehingga menyebabkan rembesan biosolar ke laut dan mencemari

perairan Lhokseumawe. Jenis minyak biosolar yang tergolong sebagai minyak ringan memiliki viskositas lebih rendah dibandingkan minyak mentah (*crude oil*), sehingga lebih mudah menyebar, menguap, dan membentuk lapisan tipis (*oil sheen*) di permukaan laut. Kondisi tersebut menyebabkan pola tumpahan minyak pada citra SAR tampak lebih terfragmentasi dan tidak membentuk lapisan gelap yang homogen, sehingga mempengaruhi hasil deteksi *oil spill* pada proses interpretasi citra radar. Minyak yang mengapung di permukaan laut dipandu ke arah bibir pantai agar lebih mudah untuk ditangani.

Salah satu keterbatasan utama dalam deteksi tumpahan minyak menggunakan citra SAR adalah kemunculan fenomena *look-alike*, seperti surfaktan alami, zona angin rendah, dan jejak kapal (Topouzelis, 2008). Studi oleh Lentini dkk. (2022) pada insiden tumpahan minyak di Brasil menunjukkan bahwa fenomena

tersebut dapat menghasilkan nilai *backscatter* rendah yang menyerupai tumpahan minyak, sehingga diperlukan interpretasi dan informasi kejadian untuk mengurangi kesalahan deteksi.

Distribusi tumpahan minyak yang terdeteksi di perairan Lhokseumawe menunjukkan potensi dampak lingkungan yang cukup luas terhadap wilayah pesisir dan ekosistem laut di sekitarnya. Sebaran minyak yang mengikuti arah arus dan angin berpotensi mencapai zona pesisir, area tambak, kawasan mangrove, hingga wilayah penangkapan ikan masyarakat pesisir. Jika pencemaran terjadi secara berulang, maka kondisi tersebut dapat menurunkan kualitas habitat laut dan mengganggu produktivitas ekosistem pesisir. Minyak yang membentuk lapisan tipis di permukaan laut dapat menghambat pertukaran oksigen dan penetrasi cahaya matahari ke badan air sehingga memengaruhi proses fotosintesis organisme laut (Beyer dkk., 2016). Selain itu, material hidrokarbon juga dapat terakumulasi pada sedimen dan biota laut dalam jangka panjang. Bagi wilayah Lhokseumawe yang memiliki aktivitas pelabuhan, distribusi industri energi, dan jalur pelayaran yang aktif, keberadaan sistem pemantauan pencemaran laut menjadi penting untuk mendukung keberlanjutan wilayah pesisir.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam proses interpretasi hasil deteksi tumpahan minyak menggunakan citra Sentinel-1A SAR. Salah satu keterbatasan utama adalah adanya ketidakpastian interpretasi citra akibat fenomena look-alike yang memiliki karakteristik *backscatter* serupa dengan tumpahan minyak, seperti zona angin rendah, surfaktan alami, gelombang internal, jejak kapal, dan akumulasi material biogenik di permukaan laut. Kondisi oseanografi dan atmosfer juga memengaruhi kualitas deteksi pada citra radar. Variasi kecepatan angin, arus laut, dan kekasaran permukaan laut dapat mengubah respons hamburan balik sehingga memengaruhi sensitivitas algoritma *adaptive threshold* dalam membedakan antara permukaan laut normal dan area yang terkontaminasi minyak. Keterbatasan lainnya adalah sensitivitas parameter *threshold* yang digunakan pada *Oil Spill Detection Tool* di SNAP (Xu dkk., 2020). Variasi nilai *threshold shift* menghasilkan luasan dan pola deteksi

yang berbeda, sehingga interpretasi hasil masih dipengaruhi oleh pemilihan parameter. *Threshold* yang terlalu rendah berpotensi meningkatkan *over detection*, sedangkan *threshold* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *under detection* terhadap lapisan minyak tipis atau *oil sheen*.

Penelitian ini juga memiliki keterbatasan temporal karena citra Sentinel-1A tidak selalu tersedia tepat pada waktu kejadian pencemaran. Sistem revisit orbit satelit menyebabkan keterbatasan dalam memantau dinamika penyebaran minyak secara kontinu. Selain itu, penelitian ini belum menggunakan data validasi in situ atau observasi lapangan secara langsung sehingga hasil deteksi masih bergantung pada interpretasi visual citra SAR dan informasi kejadian dari media serta instansi terkait. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah mengintegrasikan data penginderaan jauh lainnya, seperti kombinasi citra SAR dengan citra optik Sentinel-2 atau MODIS yang dapat membantu membedakan fenomena *look-alike* dan memperkuat interpretasi visual terhadap pola sebaran tumpahan minyak. Pengambilan sampel langsung di lokasi kejadian, dokumentasi visual lapangan, maupun pengukuran parameter kualitas perairan juga sangat penting dan dapat digunakan untuk membandingkan hasil interpretasi citra SAR dengan kondisi aktual di lapangan.

## KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa citra Sentinel-1A SAR dengan metode *adaptive thresholding* mampu mendeteksi dan memetakan tumpahan minyak di perairan Lhokseumawe, di mana setiap ukuran *threshold* menghasilkan pola sebaran yang berbeda. Pada *threshold* 1,0 dB, area terdeteksi mencapai 36,86 km<sup>2</sup> dengan pola sebaran paling luas dan tingkat fragmentasi yang tinggi. Sebaliknya, *threshold* 2,0 dB menghasilkan estimasi luas 12,82 km<sup>2</sup> dengan pola yang lebih selektif namun tetap merepresentasikan bentuk sebaran utama oil spill. Sementara itu, *threshold* 3,0 dB hanya menghasilkan area deteksi sebesar 4,61 km<sup>2</sup> karena hanya mempertahankan area dengan nilai *backscatter* paling rendah. Hal ini mengonfirmasi bahwa semakin besar nilai *threshold shift* ( $k$ ) yang digunakan, proses deteksi akan menjadi lebih selektif karena hanya area dengan nilai *backscatter* yang jauh di bawah rata-rata lokal yang teridentifikasi. Secara umum, pola sebaran ini dipengaruhi oleh dinamika arus dan

angin dari perairan lepas hingga pesisir, serta selaras dengan laporan insiden kebocoran kapal pengangkut BBM biosolar. Kendati demikian, hasil deteksi di tengah laut tetap memiliki potensi *false positive* akibat kemiripan karakteristik *backscatter* dengan fenomena oseanografi lainnya.

Melihat potensi besar citra Sentinel-1A SAR, teknologi penginderaan jauh radar ini sangat ideal diintegrasikan oleh otoritas kelautan dan pemerintah daerah ke dalam sistem deteksi dini dan pengawasan rutin pencemaran laut, khususnya pada jalur pelayaran padat di Indonesia. Pemanfaatan data spasial ini dapat mendukung identifikasi area terdampak, evaluasi risiko, serta penentuan prioritas mitigasi saat terjadi insiden tumpahan minyak lepas pantai. Namun, efektivitas sistem pemantauan ini memerlukan penguatan koordinasi dan integrasi data yang cepat antara instansi pelabuhan, perusahaan energi, pemerintah daerah, dan lembaga lingkungan.

Penelitian ini juga membuktikan bahwa penginderaan jauh radar SAR merupakan pendekatan yang adaptif dan efektif sebagai dasar pengambilan keputusan dalam penanganan pencemaran laut di wilayah pesisir. Dalam jangka panjang, integrasi antara data penginderaan jauh, Sistem Informasi Geografis (SIG), dan data oseanografi dapat menyokong penyusunan kebijakan tata ruang laut yang berkelanjutan. Informasi spasial hasil deteksi ini dapat dimanfaatkan secara strategis untuk menetapkan kawasan prioritas perlindungan lingkungan, memetakan wilayah rawan pencemaran, serta menentukan jalur pelayaran yang memerlukan pengawasan intensif.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan selama proses penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah bekerja sama, berdiskusi, dan saling mendukung dalam pengolahan data dan analisis, serta reviewers dan editor *Journal of Geographical Sciences and Education* yang telah membantu meningkatkan kualitas naskah.

### DAFTAR PUSTAKA

- Annisa, N. A., Vionica, P., & Kamal, U. (2024). Analisis Dampak Lingkungan Wilayah Pesisir Akibat Tumpahan Oil Spill di Karawang. *Media Hukum Indonesia (MHI)*, 2(2), 192-196. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11261952>
- Asmunda, A. (2022, April 24). Laut Lhokseumawe Terancam Tercemar Akibat Kapal Angkut BBM Bocor. *MASAKINI.CO*. Diakses dari <https://masakini.co/2022/04/25/laut-lhokseumawe-terancam-tercemar-akibat-kapal-angkut-bbm-bocor/>
- Astuti, A. D., & Titah, H. S. (2021). Studi Fitoremediasi Polutan Minyak Bumi di Wilayah Pesisir Tercemar Menggunakan Tumbuhan Mangrove (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1 Pesisir Karawang Jawa Barat). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), F111-F116.
- BBC News. (2018, April 4). Polisi: Tumpahan Minyak di Teluk Balikpapan Berasal dari Pipa Pertamina. Diakses dari <https://www.bbc.com/indonesia/indonesia-43640595>
- Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V., & Collier, T. K. (2016). Environmental Effects of the Deepwater Horizon Oil Spill: A Review. *Marine pollution bulletin*, 110(1), 28-51. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027>
- Chen, R., Li, B., Jia, B., Xu, J., Ma, L., Yang, H., & Wang, H. (2022). Oil Spill Identification in X-band Marine Radar Image Using K-Means and Texture Feature. *PeerJ Computer Science*, 8, e1133. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1133>
- Damayanti, F. N., Putra, I. D. N. N., Nuarsa, I. W., & Hartuti, M. (2022). Deteksi Pola Sebaran Tumpahan Minyak (Oil Spill) Menggunakan Citra Sentinel-1A di Perairan Karawang. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 8(2), 210-220. <https://doi.org/10.24843/jmas.2022.v08.i02.p06>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). *ERA5 Hourly Data on Single Levels from 1940 to Present*.

- Copernicus Climate Change Service Climate Data Store.
- Jafarzadeh, H., Mahdianpari, M., Homayouni, S., Mohammadimanesh, F., & Dabboor, M. (2021). Oil Spill Detection from Earth Observation Synthetic Aperture Radar: A Comprehensive Review and Meta-Analysis. *GIScience & Remote Sensing*, 58(7), 1022–1051. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1952542>
- Lentini, C. A. D., Mendonça, L. F. F. D., Conceicao, M. R. A., Lima, A. T., Vasconcelos, R. N. D., & Porsani, M. J. (2022). Comparison Between Oil Spill Images and Look-Alikes: An Evaluation of SAR-derived Observations of the 2019 oil Spill Incident Along Brazilian Waters. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(suppl 2), e20211207. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220211207>
- Marghany, M. (2014). Utilization of a Genetic Algorithm for the Automatic Detection of Oil Spill from RADARSAT-2 SAR Satellite Data. *Marine Pollution Bulletin*, 89(1-2), 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.10.041>
- Meyer, F. J. (2019). Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. In M. T. Banik, M. Santoro, & L. T. Dinh (Eds.), *Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* (pp. 21–64). National Aeronautics and Space Administration.
- Prastyani, R., & Basith, A. (2019). Deteksi Tumpahan Minyak di Selat Makassar dengan Penginderaan Jauh Sensor Aktif dan Pasif. *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 2(01), 88-94. <https://doi.org/10.14710/elipsoida.2019.4864>
- Saifudin, D., Subardi, A., & J, S. R. A. (2020). Penyebab dan Upaya Penanganan Tumpahan Minyak pada Kegiatan Bunker di atas Kapal LPG/C Decora. *Jurnal Sains dan Teknologi Maritim* 21(1), 40-46. <https://doi.org/10.33556/jstm.v21i1.258>.
- Suhendi, B. A. P., & Marsisno, W. (2025). Integrasi Citra Satelit Radar dan Data AIS untuk Monitoring Tumpahan Minyak dengan Pendekatan Machine Learning. *Seminar Nasional Official Statistics*, 2025(1), 193–202.
- Topouzelis, K. N. (2008). Oil Spill Detection by SAR Images: Dark Formation Detection, Feature Extraction and Classification Algorithms. *Sensors*, 8(10), 6642-6659. <https://doi.org/10.3390/s8106642>
- Xiong, X., & Butler, J. (2018). 1.01 – Volume 1 Overview. In *Comprehensive Remote Sensing* (Vol. 1, pp. 1–6). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10311-2>
- Xu, J., Song, B., Yang, X., & Nan, X. (2020). An Improved Deep Keypoint Detection Network for Space Targets Pose Estimation. *Remote Sensing*, 12(23), 3857. <https://doi.org/10.3390/rs12233857>



Copyright (c) 2026 by the authors. This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).